



UFBA

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

DOUTORADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

CELSO LUIZ SANTIAGO FIGUEIRÔA FILHO

Metodologia para inclusão de um novo fator de
influência na estimativa da probabilidade de
falha humana e análise do impacto na
confiabilidade de equipamentos



SALVADOR
2020



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

CELSO LUIZ SANTIAGO FIGUEIRÔA FILHO

**Metodologia para inclusão de um novo fator de influência na
estimativa da probabilidade de falha humana e análise do
impacto na confiabilidade de equipamentos**

Salvador
2020

CELSO LUIZ SANTIAGO FIGUEIRÔA FILHO

**Metodologia para inclusão de um novo fator de influência na
estimativa da probabilidade de falha humana e análise do
impacto na confiabilidade de equipamentos**

Tese para Qualificação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Márcio André Fernandes Martins
Coorientador: Prof. Dr. Edilson Machado de Assis, Prof. Dr. Jorge Laureano Moya Rodríguez

Salvador
2020

F475 Figueirôa Filho, Celso Luiz Santiago.

Metodologia para inclusão de um novo fator de influência na estimativa da probabilidade de falha humana e análise do impacto na confiabilidade de equipamentos / Celso Luiz Santiago Figueirôa Filho. – Salvador, 2020.

219 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Márcio André Fernandes Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Edilson Machado de Assis.

Prof. Dr. Jorge Laureano Moya Rodríguez.

Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2020.

1. Falha (diagnóstico). 2. Equipamentos - confiabilidade. 3. Sistemas – confiabilidade. 4. Erro - probabilidade. 5. Fatores humanos. I. Martins, Márcio André Fernandes. II. Assis, Edilson Machado de. III. Moya Rodríguez, Jorge Laureano. IV. Universidade Federal da Bahia. V. Título.

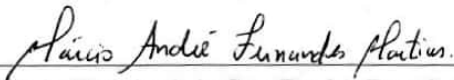
CDD: 620.00452

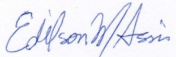
CELSO LUIZ SANTIAGO FIGUEIRÔA FILHO


Metodologia para inclusão de um novo fator de influência na estimativa da probabilidade de falha humana e análise do impacto na confiabilidade de equipamentos


Tese para Qualificação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Industrial.


Examinada por:


Prof. Dr. Márcio André Fernandes Martins^a 
Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de São Paulo, Brasil, 2014

Prof. Dr. Edilson Machado de Assis^a 
Doutor em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2013

Prof. Dr. Adonias Magdiel Silva Ferreira 
Doutor em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2015

Prof. Dr. Anastácio Pinto Gonçalves Filho 
Doutor em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2011

Prof. Dr. Isaac José Antonio Luquetti 
Doutor em Engenharia de Produção pela Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2003

Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins 
Doutor em Engenharia Naval e Oceânica, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 1999

Salvador
2020

^a Os orientadores contabilizam apenas um voto no parecer final.

Dedico este trabalho às comunidades acadêmica e industrial, ressaltando a necessidade de compreender as relações que se criam diariamente no ambiente tecnológico e as demandas que se abrem para a pesquisa aplicada na melhoria do desempenho destes sistemas complexos. À Família que nos sobrecarrega com demandas concorrentes ao trabalho, mas nos dá estabilidade emocional para cumprir os desafios de todas as dimensões da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores professores Márcio André Fernandes Martins, Jorge Laureano Moya Rodríguez e Edilson Machado de Assis pelas orientações, imensa gama de conhecimento que compartilharam comigo, incentivo, ajuda, dedicação, atenção e amizade construída ao longo desse processo. Destaco a participação do meu primeiro orientador, Prof. Dr. Robson da Silva Magalhães que continuamente me incentivou, não deixando que eu me desanimasse neste longo processo, e do atual, Prof. Dr. Márcio André Martins que assumiu este longo desafio.

Agradecimento à concessionária de energia elétrica COPEL - Companhia Paranaense de Eletrificação pelo suporte ao desenvolvimento deste trabalho através do projeto de pesquisa e desenvolvimento de título "MODELOS MATEMÁTICOS E COMPUTACIONAIS NÃO - CONVENCIONAIS PARA FORMAÇÃO DE BASE DE CONFIABILIDADE DE ATIVOS ORIENTADA PARA ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO NA GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA" de número de contrato ANEEL PD-06491-0391-2015.

*“E a perseverança deve ter ação completa,
a fim de que vocês sejam maduros e íntegros,
sem lhes faltar coisa alguma.
Se algum de vocês tem falta de sabedoria,
peça-a a Deus, que a todos dá livremente,
de boa vontade; e lhe será concedida.”
(Bíblia Sagrada, Tiago 1:4,5)*

FIGUEIRÔA FILHO, C.L.S. **Metodologia para inclusão de um novo fator de influência na estimativa da probabilidade de falha humana e análise do impacto na confiabilidade de equipamentos.** 233 f.:il.color 2020. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2020.

RESUMO

A confiabilidade de sistemas é aplicada para predição de falhas. Os resultados dos modelos de predição são efeitos dos elementos determinantes (i) processo de amostragem, (ii) processo de definição dos modelos de previsão, e (iii) fatores operacionais e ambientais. Em todos os elementos determinantes aparece o impacto do fator humano. Os métodos de avaliação da probabilidade de erro humano ajustam fatores de influência ao desempenho humano para o contexto das tarefas. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para inclusão de um novo fator de influência na estimativa da probabilidade de falha humana e analisar o impacto na confiabilidade de equipamentos em operação. Uma modelagem foi proposta para julgar um novo fator de influência no risco de falhar. O uso de drogas psicotrópicas dosadas em medicamentos comerciais foi escolhido para a análise. A modelagem demonstrou a complexidade em incluir um fator na avaliação da probabilidade de erro humano. A estrutura metodológica desenvolvida é uma contribuição significativa deste trabalho, pois é genérica e pode ser aplicada em tarefas em qualquer setor econômico. A avaliação muda o foco com a concepção das atividades observáveis padronizadas, saindo da complexidade de uma tarefa operacional para o elemento de uma tarefa. Sobre o elemento da tarefa são conhecidos como os fatores de contexto determinam o desempenho humano. Sobre a amostragem para as análises de confiabilidade, verificou-se a dificuldade em obter dados completos, e uma avaliação multivariável por Modelagem de Equações Estruturais foi desenvolvida. Os resultados apontaram uma baixa influência dos erros humanos no registro e uma forte influência da estrutura de registro das falhas. Foi proposta uma metodologia para estimar a probabilidade de erro usando a análise da tarefa e o monitoramento de variáveis dos equipamentos. Os desvios da tarefa eram apontados pelas oscilações de parâmetros monitorados. Aplicou-se o método em dois estudos de caso em equipamentos da indústria de processos contínuos. Foi possível medir a probabilidade de erros humanos e um processo para uso contínuo foi estabelecido, demonstrando o potencial de aplicação do método de coleta.

Palavras-chave: Confiabilidade, Fatores Humanos, Equações Estruturais, Estimativa de parâmetros, Probabilidade de erros.

Figueiroa Filho, C.L.S., MAGALHÃES, R.S., Assis, E.M. **Methodology for predictive monitoring of human error and its impact on the reliability of industrial equipment**. 233 pp. il. 2019. Doctorate Dissertation - Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2020.

ABSTRACT

Systems reliability is applied for failure prediction. The results of the prediction models are effects of the determinant elements (i) the sampling process, (ii) the prediction model definition process, and (iii) the operational and environmental factors. In all the determinant elements, the impact of the human factor appears. The methods of assessing the human error probability use adjust factors that influence human performance in the task context. This work aims to develop a methodology for a new influence factor inclusion when estimating the human error probability and to analyze the impact on the reliability of equipment in operation. A model was proposed to judge a new factor influencing the risk of failure. The use of commercial medicines with psychotropic drugs is the influence factor chosen for analysis. The modeling demonstrated the complexity of including a factor in the assessment of human error probability. The methodological structure developed is a significant contribution of this work, as it is generic and applied to tasks in any economic sector. Evaluation shifts the focus with the design of standardized observable activities, moving from the complexity of an operational task to a task element. For a task element, how the context factors determine human performance is a well-known subject. It was verified the difficulty in obtaining complete data for the reliability analyzes, therefore a multivariable evaluation is applied using the Structural Equation Modeling. The results showed a low influence of human errors in the failure record process and a strong influence on the records structure. A methodology was proposed to estimate the probability of error using the task analysis and equipment variables monitoring. The task deviations were pointed out by the oscillations of parameters monitored. The method was applied to two case studies in equipment from the continuous process industry. It was possible to measure the probability of human errors, and a monitoring process for use was established, demonstrating the potential for applying the collection method.

Keywords: Reliability. Human Factors. Socio-Technical Systems. Estimate parameters. Probability of Errors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desdobramento de níveis dos ternos de falha (Adaptado de RAUSAND, 1998)	48
Figura 2 – Resumo do processo de análise da confiabilidade - Etapa 1 (Fonte: Próprio Autor)	51
Figura 3 – Resumo do processo de análise da confiabilidade de sistemas - Etapa 2: amostragem. (Fonte: Próprio Autor)	52
Figura 4 – Resumo do processo de análise da confiabilidade de sistemas - Etapa 3: abordagem e modelos matemáticos. (Fonte: Próprio Autor)	53
Figura 5 – Resumo do processo de análise da confiabilidade de sistemas - Etapa 4: uso de estimadores, formulação da função a ser otimizada, seleção de critérios de aceitação da estimativa dos parâmetros e processo de otimização (Fonte: Próprio Autor)	54
Figura 6 – Resumo do método para seleção do modelo. Linhas sólidas (—) representam os passos comumente usados na literatura, enquanto as linhas pontilhadas (— .6pt) representam os passos adicionais propostos no artigo de SANTANA et al., 2018.	63
Figura 7 – Modelo Weibull	67
Figura 8 – Modelo Lognormal	67
Figura 9 – modelo Normal	67
Figura 10 – Modelo Weibull	69
Figura 11 – Modelo Lognormal	69
Figura 12 – Modelo Normal	69
Figura 13 – Mapa da revisão sobre confiabilidade humana.	70
Figura 14 – Exemplo da Técnica <i>Hierarchical Task Analysis</i> (HTA) para uma partida de uma planta industrial de processo.	74
Figura 15 – Análise da tarefa para um operador de usina hidroelétrica	75
Figura 16 – Diagrama ilustrativo do processo do CREAM.	76
Figura 17 – Exemplo Fatores influentes ao desempenho humano sobre as Tarefas (Fonte: próprio autor)	79
Figura 18 – Exemplo diagrama de influência para um evento em que ocorreu uma falha humana	81
Figura 19 – Técnicas combinadas de árvores de falhas com <i>Belief Baysean Networks</i> (BBN) associada a uma evento humano e seus fatores de influência (in TRUCCO et al., 2008).	82
Figura 20 – Influência dos PIF sobre a Ação Observável.	83

Figura 21 – Modelo estrutural 11 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.	97
Figura 22 – Modelo diagramático do método de avaliação do modelo estrutural. . .	98
Figura 23 – Fatores determinantes na definição da função confiabilidade	104
Figura 24 – Distribuição dos setores que participaram das respostas reenviadas. . .	116
Figura 25 – Resultado da afirmativa (Código FHQF2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	117
Figura 26 – Resultado da afirmativa (Código FHQF1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	117
Figura 27 – Resultado da afirmativa (Código FHER1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	118
Figura 28 – Resultado da afirmativa (Código FHIH1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	118
Figura 29 – Resultado da afirmativa (Código ORES1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	118
Figura 30 – Resultado da afirmativa (Código ORMD1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	119
Figura 31 – Resultado da afirmativa (Código ORNV1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	119
Figura 32 – Resultado da afirmativa (Código ORMT1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	119
Figura 33 – Resultado da afirmativa (Código ORMT1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	120
Figura 34 – Resultado da afirmativa (Código ORST1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	120
Figura 35 – Resultado da afirmativa (Código ORST2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	120

Figura 36 – Resultado da afirmativa (Código ORPO1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	121
Figura 37 – Resultado da afirmativa (Código ORLB1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	121
Figura 38 – Resultado da afirmativa (Código ORLB2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	121
Figura 39 – Resultado da afirmativa (Código CXCF1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	122
Figura 40 – Resultado da afirmativa (Código CXAM1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	122
Figura 41 – Resultado da afirmativa (Código CXOP1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	122
Figura 42 – Resultado da afirmativa (Código OTES1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	123
Figura 43 – Resultado da afirmativa (Código OTTP1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	123
Figura 44 – Resultado da afirmativa (Código OTPL3) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	123
Figura 45 – Resultado da afirmativa (Código ESTT1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	124
Figura 46 – Resultado da afirmativa (Código ESTT2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	124
Figura 47 – Resultado da afirmativa (Código ESTT3) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).	124
Figura 48 – Modelo estrutural 9 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.	126

Figura 49 – Modelo estrutural 10 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.	126
Figura 50 – Modelo estrutural 11 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.	127
Figura 51 – Resultados do indicador AVE para o Modelo estrutural 9.	128
Figura 52 – Resultados do indicador AVE para o Modelo estrutural 10.	129
Figura 53 – Resultados do indicador AVE para o Modelo estrutural 11.	129
Figura 54 – Resultados parâmetro Confiabilidade Composta para o Modelo estrutural 9.	130
Figura 55 – Resultados do parâmetro Confiabilidade Composta para o Modelo estrutural 10.	130
Figura 56 – Resultados do parâmetro Confiabilidade Composta para o Modelo estrutural 11.	131
Figura 57 – Resultados do indicador Alfa de Cronbach para o Modelo estrutural 9.	135
Figura 58 – Resultados do indicador Alfa de Cronbach para o Modelo estrutural 10.	135
Figura 59 – Resultados do indicador Alfa de Cronbach para o Modelo estrutural 11.	135
Figura 60 – Resultados do indicador f^2 , para o Modelo estrutural 9.	137
Figura 61 – Resultados do indicador f^2 , para o Modelo estrutural 10.	137
Figura 62 – Resultados do indicador f^2 , para o Modelo estrutural 11.	138
Figura 63 – Resultados na matriz Fornell & Larcker para o modelo 9	140
Figura 64 – Resultados na matriz Fornell & Larcker para o modelo 10	140
Figura 65 – Resultados na matriz Fornell & Larcker para o modelo 11	141
Figura 66 – Resultados do indicador p -valor para as hipóteses do modelo 9	142
Figura 67 – Resultados do indicador p -valor para as hipóteses do modelo 10	142
Figura 68 – Resultados do indicador p -valor para as hipótese do modelo 11	142
Figura 69 – Modelo estrutural proposto para avaliação dos fatores determinantes para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.	152
Figura 70 – Resultados das cargas cruzadas do modelo estrutural 15.	154
Figura 71 – Resultados da matriz de covariância de Fornell & Larcker do modelo estrutural 15.	155
Figura 72 – Resultados do R2 do modelo estrutural 15.	156
Figura 73 – Resultados do f^2 do modelo estrutural 15.	156
Figura 74 – Resumo das áreas de conhecimento e de assuntos envolvidos na elaboração da estrutura metodológica para avaliação do efeito do uso de drogas psicotrópicas no desempenho humano	162

Figura 75 – Decomposição das tarefas em atividades observáveis, n_{at} = número de vezes que a atividade a ocorre na tarefa t	162
Figura 76 – Relevância das funções psíquicas nas atividades observáveis.	167
Figura 77 – Efeito das drogas psicotrópicas nas funções psíquicas. e_{df} = efeito das drogas psicotrópicas d na função psíquica f	168
Figura 78 – Rede de influência entre drogas psicotrópicas x funções psíquicas x ações observáveis x tarefas	170
Figura 79 – Sequência para sistematização de um monitoramento preditivo dos dados de falha humana.	181
Figura 80 – Ilustração da disposição dos equipamentos em um dos conjuntos do estudo de caso.	191
Figura 81 – Procedimento para o ciclo operacional da bomba - Partida e Parada . .	196
Figura 82 – Tela de monitoramento da vibração global da bomba, exemplos de vibração excessiva na partida e de ciclo sem vibração excessiva.	198
Figura 83 – Tela de monitoramento da vibração global da bomba, exemplo de vibração excessiva no final do ciclo de operação	199
Figura 84 – Função confiabilidade das bombas para diferentes períodos, antes e após a modificação dos procedimentos operacionais	201
Figura 85 – Função densidade de probabilidade das quebras das bombas $f(t)$ para os períodos de 2005 a 2008 e de 2009 a 2016	202
Figura 86 – Taxa de falhas instantânea da quebra das bombas $h(t)$ para os períodos de 2005 a 2008 e de 2009 a 2016	202
Figura 87 – Frequência de violações semanais (HEP) de 2006 e de 2012.	204
Figura 88 – Função confiabilidade humana $R(t)$ dos anos de 2006 e 2012	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuições de probabilidades contínuas mais usadas na confiabilidade, suas premissas e aplicações - parte 1	44
Tabela 2 – Distribuições de probabilidade contínuas mais usadas em confiabilidade, suas premissas e aplicações - parte 2	45
Tabela 3 – Distribuições de probabilidades discretas mais usadas na confiabilidade, suas premissas e aplicações	46
Tabela 4 – Resultados dos parâmetros da distribuição de Weibull por Modo de Falhas (MF) do sub-sistema elétrico (Fonte: FILHO C L S FIGUEIRÔA, 2017)	50
Tabela 5 – Índices de qualidade do ajuste (<i>Goodness of fit-GOF</i>) aplicados a análise de confiabilidade e exemplos do seu uso (adaptado de SANTANA et al., 2018)	59
Tabela 6 – Case 2 - Intervalos de abrangência dos parâmetros, para as abordagens convencional e residual.	66
Tabela 7 – Estudo de caso - Estimativa dos <i>Goodness of fit</i> e os intervalos de abrangência de 95% probabilidade.	68
Tabela 8 – Exemplo de categorias de fatores de influencia no desempenho humano	79
Tabela 9 – Lista de ações observáveis de tarefas industriais	83
Tabela 10 – Construtos propostos, códigos e hipótese propostas para a proposta de análise da amostragem para confiabilidade do modelo 9.	110
Tabela 11 – Lista de V_m - Variáveis mensuráveis do modelo 9	112
Tabela 12 – Lista de afirmativas do formulário com os códigos e agrupamento nos construtos propostos no modelo conceitual.	113
Tabela 13 – Lista de afirmativas disponibilizadas no formulário com os códigos e ou agrupamento nos construtos propostos no modelo conceitual.	114
Tabela 14 – Definição do tamanho da amostragem para uma regressão linear múltipla Considerando o efeito do tamanho da amostra e o poder de identificação da negação da hipótese nula - Power $(1 - \beta)$	115
Tabela 15 – Indicador α de Cronbach para os resultados obtidos do formulário sobre caracterização da amostragem para a confiabilidade de equipamentos.	125
Tabela 16 – Resultados das cargas cruzadas do modelo estrutural 9.	132
Tabela 17 – Comparativo das raízes das AVE de cada V_i com as cargas cruzadas	133
Tabela 18 – Comparativo de resultados da Confiabilidade para os Modelo 9, 10 e 11.	134
Tabela 19 – Resultados comparativos do indicador R^2 dos modelos 9, 10 e 11	136
Tabela 20 – Resultados comparativos do indicador AIC dos modelos 9, 10 e 11	138
Tabela 21 – Comparativo de resultados da Colinearidade das variáveis endógenas e exógenas para os Modelo 9, 10 e 11.	144

Tabela 22 – Lista de V_m - Variáveis mensuráveis do modelo 15	148
Tabela 23 – Lista de afirmativas do formulário com os códigos e agrupamento nos construtos propostos no modelo conceitual.	150
Tabela 24 – Indicador α de Cronbach para os resultados obtidos do formulário sobre elementos determinantes da confiabilidade.	151
Tabela 25 – Resultados dos indicadores de consistência interna do modelo estrutural 15 para a análise dos fatores de influência na confiabilidade de equipamentos.	153
Tabela 26 – Resultado das cargas fatoriais para o modelo estrutural 15 da análise dos Fatores influentes na confiabilidade operacional.	154
Tabela 27 – Número de ocorrências e frequência de cada atividade na tarefa 'inspeção de rotina do operador de usina'.	163
Tabela 28 – Categorias de drogas psicotrópicas selecionadas.	165
Tabela 29 – Lista de funções psíquicas mais relevantes.	166
Tabela 30 – Ilustração com exemplos de atividades observáveis associadas às funções psíquicas.	167
Tabela 31 – Exemplo de relevância das funções psíquicas para a atividade de Monitoramento.	168
Tabela 32 – Escala qualitativa de símbolos para avaliação dos efeitos das drogas nas funções psíquicas.	169
Tabela 33 – Exemplo da avaliação da relevância das funções psíquicas na atividade de monitoramento e dos efeitos de uma categoria de drogas psicotrópicas nas funções	169
Tabela 34 – Valores atribuídos na escala qualitativa da relevância das funções psíquicas nas ações.	171
Tabela 35 – Valores atribuídos na escala qualitativa do efeito das drogas nas funções psíquicas.	171
Tabela 36 – Exemplo de valores atribuídos para obter o impacto do efeito da droga na atividade. A categoria de medicamento é a Anti-depressivos Tricíclicos. A droga é a Amitriptilina, e a atividade é Monitoramento.	173
Tabela 37 – Comparativo do uso da Amitriptilina e não uso no valor da HEP para a tarefa 'inspeção de rotina' do operador.	176
Tabela 38 – Exemplo de análise de uma tarefa com a identificação das ações de automação e as humanas. (PLC - <i>Programmable Logic Controller</i> ; DCS - <i>Distributed Control System</i>).	184
Tabela 39 – Exemplo de análise de uma tarefa com a identificação das ações de automação e as humanas. (PLC - <i>Programmable Logic Controller</i> ; DCS - <i>Distributed Control System</i>).	185

Tabela 40 – Exemplo de análise de uma tarefa com a identificação das ações de automação e as humanas.(PLC - <i>Programmable Logic Controller</i> ; DCS - <i>Distributed Control System</i>)	186
Tabela 41 – Exemplo de cálculo das HEP em intervalos dentro do período de avaliação	188
Tabela 42 – Número de ciclos operacionais em 2 períodos distintos	193
Tabela 43 – Falhas ocorridas nas 16 bombas no período de 11 anos	195
Tabela 44 – Cálculo do Tempo Entre Falhas (<i>TBF</i>) das bombas Id 3 e 4.	195
Tabela 45 – Exemplo de coleta de ciclos operacionais e violações ocorridas em uma semana	198
Tabela 46 – Violações por ciclos para uma semana de operações, com correção dos valores das quantidade de violações e cálculo da frequência	200
Tabela 47 – Coeficiente de determinação (R^2) e AIC para os modelos matemáticos estimados das funções densidades das falhas das bombas testados, para os períodos de operação selecionados	201
Tabela 48 – Parâmetros obtidos para o modelos Weibull para os conjuntos de dados de falha dos períodos selecionados	201
Tabela 49 – Parametros da distribuição de Weibull para a <i>HEP</i> para os dois períodos selecionados	203
Tabela 50 – <i>Goodness of fit</i> da função densidade da <i>HEP</i> para o modelo de Weibull.	203

LISTA DE ABREVIATURAS

AFC	Análise Fatorial Confirmatória
AVE	<i>Average Variance Extracted</i>
BBN	<i>Belief Baysean Networks</i>
CREAM	<i>Cognitive Reliability and Error Analysis Method</i>
FAF	Função Acumulada de Falhas
FC	Função Confiabilidade
FID	Fatos de Influência no Desempenho
GUM	<i>Guide for Uncertainties in Measuring</i>
HEP	<i>Human Error Probability</i>
HRA	<i>Human Reliability Assessment</i>
HTA	<i>Hierarchical Task Analysis</i>
HFM	<i>Human Factors Methods</i>
HEPDF	<i>Human Error Probability Density Function</i>
HSE	<i>Healthy and Safety Executive</i>
ID	<i>Influence Diagrams</i>
MEE	Modelagem de Equações Estruturais
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTF	<i>Mean Time To Fail</i>
OREDA	<i>Offshore REliability DAta</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PSF	<i>Performance Shaping Factor</i>
PIF	<i>Performance Influencing Factor</i>
PLS	<i>Partial Least Squares</i>
PRA	<i>Probability Safety Assessment</i>
PSA	<i>Process Safety Assessment</i>
SACADA	<i>Scenario Authoring, Characterization, and Debriefing Application</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
STS	<i>Sociotechnical Systems</i>
TBF	<i>Time Between Failures</i>
THERP	<i>Technique for Human Error Probability</i>

LISTA DE PUBLICAÇÕES

- Figueiroa Filho, C. L. S., FRIAS, Diego, DE ASSIS, E. M., Lima, G. A. D. C., Magalhaes, R. S., 2020. **The Effect of Psychotropic Drugs as a Performance Influencing Factor on Human Reliability Assessment**. *IEEE Access*, vol. 8, p. 80654-80672.
- Santana, D.D., Figueiroa Filho, C.L.S., I. Sartori, M.A.F.Martins, 2018. **A novel Bayesian approach for reliability modeling : The benefits of uncertainty evaluation in the model selection procedure**. *Quality and Reliability Engineering International*, 34(March), pp.1–15.
- Santiago Figueirôa Filho, C.L., Assis, E.M., Jordi, L.S., Costa, A.L.B., 2017. Reliability Analysis by Dynamic Fault Trees - A case study in sewage treatment systems. **Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**. Available at: <http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COB17/2054>.
- Figueiroa Filho, C.L.S., E.M. Assis, L.S. Jordi, A.L.C. Brasileiro. Análise e Coleta de Dados para Confiabilidade e Risco- Estudo de caso: Sistemas de bombeamento de esgotos. **3º congresso internacional da ABRISCO - Associação Brasileira de Confiabilidade e Risco**, Rio de Janeiro-Brasil, 2017.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
2	REVISÃO SOBRE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS, ENGENHARIA DE FATORES HUMANOS E MODELAGEM POR EQUAÇÕES ESTRUTURAIS	37
2.1	CONFIABILIDADE DE SISTEMAS	38
2.1.1	Variáveis aleatórias da função confiabilidade de sistemas	39
2.1.2	Funções de caracterização da confiabilidade	40
2.1.3	Modelos Matemáticos probabilísticos	41
2.1.3.1	Distribuições contínuas	42
2.1.3.2	Distribuições de probabilidades discretas	43
2.1.4	Coleta de dados para análises de Confiabilidade e as causas de incoerências	47
2.1.5	Processo para definição da Função Confiabilidade	51
2.1.6	Seleção dos modelos matemáticos para a função confiabilidade	55
2.1.6.1	Abordagens para seleção do Modelo	55
2.1.6.2	Estimativa dos parâmetros dos modelos das funções	56
2.1.6.3	Crítérios de avaliação dos ajustes aos modelos (<i>goodness of fit</i>)	57
2.1.7	Avaliação da Incerteza	59
2.1.8	Abordagem Clássica x Abordagem bayseana por resíduos	62
2.1.8.1	Uma proposta de sistematização do processo de seleção do modelo e estimativa dos parâmetros	64
2.1.8.2	Estudo de caso do uso do intervalo de abrangência como critério de avaliação da estimativa dos parâmetros	65
2.2	REVISÃO SOBRE ENGENHARIA DE FATORES HUMANOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA	70
2.2.1	Engenharia de Fatores Humanos	71
2.2.1.1	Análise de Tarefas	73
2.2.2	Fatores de Influência no desempenho humano	76
2.2.2.1	Categorização dos Fatores de Influência	78
2.2.2.2	Modelos por redes dos FID	80
2.2.2.3	Modelo por frequência de ações observáveis	82
2.2.3	Psicologia Cognitiva	84
2.2.4	Confiabilidade Sócio-Técnica	85
2.2.5	Confiabilidade humana	86
2.2.5.1	Estimativa do valor da <i>Human Error Probability Density Function</i> (HEPDF)	87
2.2.5.2	Identificação da falha humana para medição	88

2.2.5.3	Amostras de Falhas Humanas	89
2.2.5.4	Métodos para avaliação da confiabilidade humana <i>Human Reliability Assessment</i> (HRA)	91
2.2.5.5	Restrições para seleção do Modelo matemático da <i>Human Error Probability Density Function</i> (HEPDF)	92
2.2.5.6	Validação e verificação do modelo	92
2.3	REVISÃO SOBRE MODELAGEM POR EQUAÇÕES ESTRUTURAIS - MEE	93
2.3.1	Análise multivariada	95
2.3.2	Análise combinatória fatorial	96
2.3.3	Modelo Conceitual	96
2.3.4	Método validação do modelo proposto	98
2.3.4.1	Avaliação da Validade Convergente	99
2.3.4.2	Avaliação da Validade Discriminante	100
2.3.4.3	Avaliação da Consistência interna (Confiabilidade)	100
2.3.4.4	Avaliação do Modelo Estrutural pela relação entre as V_l	100
2.3.4.5	Avaliação do Modelo Estrutural pela independência entre as V_l	102
2.3.4.6	Avaliação do Modelo Estrutural quanto a interindependências entre V_l e V_m	102
2.3.4.7	Avaliação do questionário	102
2.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	103
3	MEE - MODELAGEM POR EQUAÇÕES ESTRUTURAIS DOS FATORES DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS E DE SUA AMOSTRAGEM	107
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	107
3.1.1	Instrumento de avaliação	107
3.1.1.1	Aplicação com o Google form	107
3.1.1.2	Perfil dos profissionais respondentes	107
3.2	APLICAÇÕES	108
3.2.1	Modelagem por Equações Estruturais da Caracterização da amostragem para estimativa da confiabilidade de sistemas	109
3.2.1.1	Protocolo de avaliação das V_m	112
3.2.1.2	Cálculo do tamanho da amostra	115
3.2.1.3	Setores industriais envolvidos	116
3.2.1.4	Resultados dos formulários	117
3.2.1.5	Resultados dos modelos estruturais da análise sobre Caracterização da amostragem para a confiabilidade	125
3.2.1.6	Avaliação da Validade Convergente	128
3.2.1.7	Avaliação da Validade Discriminante	131

3.2.1.8	Confiabilidade e consistência interna do modelo conceitual e da amostra trabalhada.	133
3.2.1.9	Avaliação do Modelo Estrutural pela relação entre as V_l	136
3.2.1.10	Avaliação do Modelo Estrutural pela independência entre as V_l	139
3.2.1.11	Avaliação do Modelo Estrutural quanto a interindependências entre V_l e V_m	143
3.2.1.12	Conclusões do estudo de caso sobre a caracterização da amostragem para uso nas análises de confiabilidade de sistemas	145
3.2.2	Modelagem por Equações Estruturais dos Fatores determinantes na confiabilidade de sistemas	146
3.2.2.1	Protocolo de avaliação das V_m e seus resultados	149
3.2.3	Resultados do estudo sobre fatores determinantes na confiabilidade de equipamentos	151
3.2.3.1	Conclusões sobre o estudo dos elementos influentes na confiabilidade de sistemas	157
3.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	157
4	UM NOVO FATOR DE INFLUÊNCIA NA CONFIABILIDADE HUMANA: O USO DE DROGAS PSICOTRÓPICAS	159
4.1	INTRODUÇÃO	159
4.2	REVISÃO SOBRE OS EFEITOS DAS DROGAS PSICOTRÓPICAS	160
4.3	MÉTODO	161
4.3.1	Engenharia de fatores humanos	162
4.3.2	Dimensão Psiquiátrica	165
4.3.3	Dimensão Matemática e Computacional	171
4.3.4	Confiabilidade Humana	174
4.4	ESTUDO DE CASO	174
4.4.1	Resultados	175
4.4.2	Discussão	177
4.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	177
5	MONITORAMENTO PREDITIVO DE FALHAS HUMANAS E A SISTEMATIZAÇÃO DA COLETA DOS DADOS	179
5.1	INTRODUÇÃO	179
5.2	ABORDAGEM PROPOSTA PARA MONITORAMENTO PREDITIVO DE FALHAS HUMANAS EM CAMPO	179
5.3	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	183
5.4	ESTUDO DE CASO 2 - MONITORAMENTO PREDITIVO DE FALHAS HUMANAS	188
5.4.1	Método	189

5.4.1.1	Modelos Matemáticos Analisados	190
5.4.1.2	Coleta de dados	190
5.4.1.3	Análise da tarefa do procedimento descrito	190
5.4.2	Descrição e contexto do estudo de caso	191
5.4.2.1	Condições operacionais	191
5.4.2.2	Seleção dos períodos de avaliação antes e após as mudanças operacionais	193
5.4.3	Entrevistas	193
5.4.4	Coleta de dados de falhas das bombas	194
5.4.5	Coleta das violações operacionais ao procedimento	195
5.4.5.1	Definição da violação ao procedimento	197
5.4.6	Resultados	200
5.4.6.1	Função Confiabilidade das Bombas	200
5.4.6.2	Função densidade de probabilidade da HEP	203
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	206
6	CONCLUSÕES	209
6.1	COMENTÁRIOS FINAIS	212
	REFERÊNCIAS	213

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da teoria da confiabilidade caminhou para a predição da confiabilidade de elementos e/ou a combinação dos elementos em sistemas. Para aumentar a confiabilidade, há duas alternativas possíveis mais conhecidas: instalar componentes com maior confiabilidade cada um ou desenvolver um novo arranjo construtivo dos componentes. Por sua vez, ao se falar em componentes do sistema, os seres humanos que interagem com estes sistemas devem ser incluídos na discussão, mesmo para casos nos quais há alto grau de automação.

Este trabalho aborda a influência do ser humano na confiabilidade dos sistemas, em busca de formas de avaliar esta influência e de como mensurar a confiabilidade humana em sistemas industriais.

Apesar da influência do componente humano nos sistemas ser percebido como algo evidente, não há uma compreensão suficiente da contribuição do fator humano nos modelos matemáticos encontrados que representam a confiabilidade de sistemas, como ocorre com alguns fatores intrínsecos à operação os sistemas (ocupação do processo produtivo; variação da matéria prima, de insumos como energia, vapor, ar comprimido; variação do meio ambiente onde o sistema está alocado; variação da qualidade dos materiais instalados após serviços de reparo; variações dos sistemas de informação e controle, etc.).

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é apresentar a metodologia para inclusão de um novo fator de influência na estimativa da probabilidade de falha humana e analisar o impacto na confiabilidade de equipamentos em operação.

Para tanto, os objetivos específicos abaixo devem ser atingidos:

- Identificar os elementos que determinam a função confiabilidade de sistemas, propondo a categorização destes elementos.
- Identificar causas de obtenção de dados incompletos para as análises de confiabilidade de sistemas, que incluam fatores causais como falhas humanas.
- Elaborar modelo para avaliar um novo fator de influência ao desempenho humano e seu impacto na probabilidade de falhas humanas.
- Desenvolver processo para levantamento das probabilidades de falhas humanas em equipamentos em operação.

Esta tese foi organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1 - neste capítulo, é declarado o objetivo do trabalho e a discriminação dos capítulos que compõe todo o texto. Não é feito nesta introdução a revisão bibliográfica.
- Capítulo 2 - este capítulo é constituído por (i) uma introdução sobre análise quantitativa da confiabilidade de sistemas (seleção dos modelos matemáticos, as abordagens para seleção dos modelos e os métodos para estimativa dos parâmetros desta função); (ii) uma revisão sobre a Engenharia de Fatores Humanos com as abordagens de engenharia para modelar o desempenho humano, e os métodos para estimar a Confiabilidade Humana (HRA—*Human Reliability Assessment*); (iii) uma revisão sobre Modelagem de Equações Estruturais (MEE), em que é apresentado o método para avaliação dos modelos conceituais que serão desenvolvidos em outro capítulo.

Ainda no capítulo, é feita uma introdução sobre a dificuldade para o levantamento de dados de confiabilidade em sistemas industriais, assim como a dificuldade para a caracterização de dados de falha humana nos ambientes de produção industrial. O texto também trata da complexidade para a tomada de decisão pelos engenheiros de confiabilidade, já que as escolhas das abordagens, modelos, métodos e origem da coleta do dados influenciam na análise e nos próprios resultados.

- Capítulo 3 - nesta parte são investigados dois temas que são relevantes no desenvolvimento de métodos para avaliar a influência do ser humano na confiabilidade: (i) fatores que determinam a caracterização da amostragem para análises de confiabilidade, incluindo o erro no registro; (ii) dos fatores determinantes na confiabilidade de sistemas. Para as análises multivariáveis foi aplicada a Modelagem de Equações Estruturais (MEE).

- Capítulo 4 - neste capítulo, um novo fator de influência no desempenho humano é investigado, o uso de drogas psicotrópicas, além de apresentar um modelo para avaliação quanto ao impacto na probabilidade de falha humana.

Em vista disso, é exposto o exemplo do processo de coleta do impacto de medicamentos que afetam o sistema nervoso central no desempenho de tarefas industriais. A situação demonstra a sofisticação para a obtenção dos dados sobre um dos fatores influentes.

- Capítulo 5 - parte na qual é apresentado um processo de coleta para os dados de falha humana, considerando-se o contexto tecnológico das indústrias nacionais. Um método completo para a determinação da probabilidade de falha humana é proposto, e um primeiro estudo de caso demonstra a aplicação. Neste capítulo, também é apresentado um segundo estudo de caso, no qual é exposto o resultado da análise realizada sobre os 11 anos de coleta de dados de falhas de um conjunto de bombas centrífugas. Esse levantamento possibilitou a identificação, de forma consistente,

do fator humano como um fator com uma influência determinante na melhoria da confiabilidade dos equipamentos ao longo do tempo. Para caracterizar a falha humana e definir uma probabilidade associada, foi desenvolvida a relação entre os dados do sistema de monitoramento da vibração com as tarefas dos operadores.

- Capítulo 6 - Finalizando este trabalho, há as conclusões desta tese. Dentre elas, as considerações sobre como a influência de vários elementos no processo de estimativa dos modelos de predição, o impacto do uso de drogas na estimativa da probabilidade de erro humano calculado pela frequência das ações observáveis, e a possibilidade em obter a frequência dos desvios humanos em processos produtivos através das variáveis de monitoramento dos equipamentos.

2 REVISÃO SOBRE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS, ENGENHARIA DE FATORES HUMANOS E MODELAGEM POR EQUAÇÕES ESTRUTURAIS

Em Sistemas em ambientes onde a tolerabilidade a falha deve ser baixa, a avaliação da confiabilidade passou a ser um requisito para aceitação de qualquer projeto. São muitos os setores industriais que aplicam os conceitos de confiabilidade de sistemas, como petróleo e gás, petroquímica, papel e celulose, aviação, mineração, siderurgia, geração e transmissão de energia, aeroespacial, farmacêutico e bebidas.

A confiabilidade também é usada para estabelecer as políticas de garantia de produtos. Para definir o prazo de garantia, o fabricante do produto assume um nível de risco de falha para o qual vai desenvolver um suporte econômico para devolução de produtos caso ocorra essas falhas, e realizam os testes nos produtos para comparar com o risco tolerado de falha. Dessa maneira, são desenvolvidos testes de confiabilidade dos componentes e equipamentos em laboratório, controlando as variáveis de uma missão a ser cumprida pelo produto. Além disso, com os resultados dos testes, também são construídos bancos de dados para serem utilizados em projetos de sistemas.

Na realização dos testes de laboratório, é preciso informar que o domínio sobre as variáveis de processo e o ambiente é grande, ou seja é um sistema controlado. O conhecimento desenvolvido para os testes de confiabilidade em condições de laboratório já é atualmente bem dominado e a modelagem matemática envolvida nas análises também já tem uma vasta bibliografia sedimentada (JIANG; KECECIOGLU, 1992; DODSON; NOLAN, 1999; DHILLON, 2006).

Já para realizar as análises de confiabilidade de sistemas industriais que estão em operação, a condição é de muita variabilidade. A dinâmica de mudança nestes processos é intrínseca, pois todos os fatores do processo produtivo variam, tais como: matéria prima, insumos e condições ambientais. Neste cenário, a diversidade dos caminhos para obter os dados e para desenvolver a modelagem matemática é grande, pois muitas premissas precisam ser assumidas, já que existe grande quantidade de fatores que influenciam no resultado.

Diante do exposto, a proposta desta tese passa por uma análise do processo de estimativa das funções características da confiabilidade, identificando os fatores que influenciam nesta estimativa, pela descrição atual do processo de levantar uma amostra de dados completos para as análises de confiabilidade, e em avaliar o impacto do fator humano na confiabilidade. Para tanto, na primeira etapa do trabalho serão revisados três assuntos principais: (i) o processo de estimativa dos modelos matemáticos e seus parâmetros das funções características da confiabilidade, (ii) a estimativa quantitativa e qualitativa dos fatores humanos e (iii) uma abordagem para avaliação multivariada chamada modelagem por equações estruturais. A modelagem por equações estruturais foi escolhida porque

poderia estabelecer uma teoria geral sobre a confiabilidade de sistemas fundamentada na experiência dos engenheiros de confiabilidade brasileiros, devido ao grupo de pesquisa, do qual o presente autor faz parte, ter experiência na aplicação da modelagem, além da disponibilidade de acesso ao software SmartPLS para realizar as simulações.

Este capítulo é composto por três seções principais revisando os assuntos que serão trabalhados nos capítulos a frente. A primeira seção apresenta o assunto confiabilidade de sistemas, a segunda a confiabilidade humana e a terceira a modelagem por equações estruturais.

2.1 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

Segundo a norma ABNT ISO-14.224 (ISO 14224, 2016), a confiabilidade é definida como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Ela é uma característica inerente ao projeto (RAUSAND; HSYLAND, 2004a; RAUSAND; ØIEN, 1996; DODSON; NOLAN, 1999). Verifica-se na definição a necessidade de se estabelecer uma missão (como ocorre a operação para o item), um tempo de verificação da característica e qual ou quais funções serão desempenhadas pelo item.

A missão é definida por condições de operação de um sistema. Duas grandes áreas podem ser definidas: (i) Ambientais - Clima (pressão, temperatura, umidade, precipitações), poluentes, luminosidade, etc.; (ii) Operacionais - velocidade, carga, instabilidades, nível de utilização, vibração, contaminantes do processo, eletromagnetismo dos sistemas próximos, etc. (RAUSAND; HSYLAND, 2004b; DODSON; SCHWAB, 2006; DHILLON, 2006).

A função a ser desempenhada é a razão de existir o item (elemento), equipamento ou sistema. É o necessário para prover um dado serviço. A função deve ser descrita por um verbo, um objeto sobre o qual a ação é praticada, e um complemento, o qual define um padrão de desempenho (quantitativo se possível). Os padrões de desempenho descritos devem ser adotados como o nível de desempenho desejado (pelo dono ou usuário do item ou ativo) em seu contexto operacional (exemplo: instrumento medir vazão de água de 0 a 100 m³/h, correia transportar minério 4000 t/h, guindaste elevar uma carga de até 20 t a 12 m/min, produzir pacotes de 250 g). A não realização da função esta associada a uma falha funcional, a qual pode ser causada por falhas em vários elementos de um sistema. Esses elementos do sistema, por sua vez, podem ter vários tipos de falhas, cada uma delas com causas diferentes. Estas causas podem se originar de vários mecanismos de falhas distintos, tais como os processos de corrosão, abrasão, cavitação, etc. Cada um destes fenômenos causais vão gerar curvas de confiabilidade diferentes, e em um sistema essas curvas vão se combinar, já que um sistema tem vários elementos submetidos a mecanismos de falhas diferentes. Este conjunto de definições e de caracterização das condições de falha

afetam as análises finais sobre os modelos de previsão da confiabilidade.

A falha funcional, por definição, é o estado de um item caracterizado pela sua incapacidade para desempenhar a função requerida, excluindo-se tal incapacidade durante a manutenção preventiva, outras ações planejadas ou devido a falta de recursos externos ao item (ISO 14224, 2016).

Um equipamento ou um sistema também tem funções complementares à sua função principal, como, por exemplo, garantir a segurança do usuário. Estas funções auxiliares muitas vezes são mais críticas que a função principal. Um exemplo disso é a garantia da estanqueidade para um fluido inflamável ou tóxico em um sistema de bombeio.

O tempo é a variável aleatória independente, de interesse, nas análises de confiabilidade. O tempo pode estar baseado em calendário, nas horas de operação, em ciclos, bateladas, ou mesmo em outra medida (indireta), tais como a quilometragem percorrida por um veículo. Os tempos entre estados de falha são usados como uma variável independente para obter a Função Acumulada de Falhas (FAF) e a sua complementar, a Função Confiabilidade (FC).

As próximas subseções apresentam assuntos que compõem a função confiabilidade de sistemas e em como ela é usada na literatura já estabelecida na engenharia. A estrutura das subseções tem como objetivo revisar estes assuntos e chamar a atenção sobre os fatores que podem impactar nos resultados da função confiabilidade, alguns deles no processo matemático, outros da operação dos sistemas industriais e podem ocorrer no processo de coleta dos dados.

2.1.1 Variáveis aleatórias da função confiabilidade de sistemas

Como visto, o tempo até a ocorrência de uma falha é a variável que baseia as abordagens mais usadas na avaliação da confiabilidade de componentes e sistemas. Em condições de teste em laboratório, coloca-se uma amostra de componentes ou sistemas em funcionamento e, a cada falha, retira-se desse conjunto de amostras o elemento que tenha falhado. Assim, são obtidos os dados que são arquivados em bancos de dados, por exemplo, de componentes eletrônicos (MIL-STD-217).

Um outro cenário em que se determina o tempo até a ocorrência de uma falha é quando um componente do sistema falha e é reparado. Após o reparo, retorna-se ao uso do sistema, reiniciando-se um novo ciclo para a variável Tempo entre Falhas (TBF–*Time Between Failures*). Esse método de coleta pode ser aplicado a equipamentos que estão em uso em sistemas industriais, e, conforme eles falham, os tempos entre uma falha e outra devem ser registrados. A essa condição, e considerando-se as mesmas premissas apresentadas, são tratadas outras premissas para o ajuste correto de um modelo matemático, tais como: (i) considerar que o componente retornou tão bom quanto um novo, chamado

modelo *as good as new* (RAUSAND; ØIEN, 1996; DODSON; NOLAN, 1999; ASSIS et al., 2019), ou (ii) que uma nova condição operacional se estabelece e as informações históricas não são consideradas as mesmas (LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009). Existem setores econômicos que usam a situação (i) para atualizar os seus bancos de dados de confiabilidade de equipamentos, e os valores obtidos para cada componente são usados como referência para os novos projetos, a exemplo do *Offshore REliability DAta* (OREDA) (RAUSAND; ØIEN, 1996).

Também é possível apontar outras variáveis aleatórias na determinação da função densidade de probabilidade de falhas (PDF–*Probability Density Function*). Fatores tais como a carga de trabalho do equipamento (exemplo: 70% de uma capacidade nominal de 100 t/h), o nível de ocupação do equipamento, o produto que está em processo (quando existe a variação das propriedades como a densidade, a temperatura e o nível de contaminantes), perfil da operação (habilidades e experiência do operador) ou a política de manutenção. Uma abordagem possível seria a aplicação de uma modelagem multivariável (GALÁN; MOSLEH; IZQUIERDO, 2007) para lidar com todos esses elementos, porém, não é o foco deste trabalho.

2.1.2 Funções de caracterização da confiabilidade

A confiabilidade de componentes e sistemas pode ser caracterizada pelas funções descritas abaixo, as quais têm como variável aleatória o tempo entre estados falhos (*Time Between Failures* (TBF)):

- Taxa instantânea de falhas - a taxa de falha pode ser interpretada como a razão do número de falhas em um intervalo, pelo número de sobreviventes no início do intervalo;
- Função densidade de probabilidade de falha - a densidade de falha representa a probabilidade de um componente que está bom em $t=0$, falhar no intervalo $(t, t+dt)$;
- Função de probabilidade acumulada de falhas crescente - a probabilidade de falha (ou não-confiabilidade) representa o percentual das falhas acumuladas até um dado instante de tempo;
- Função de probabilidade acumulada de falha decrescente (Função confiabilidade) - representa o percentual de sobreviventes até um dado instante de tempo, ou seja, a probabilidade de sobrevivência.

Também são usados os índices a seguir:

- *Mean Time To Fail* (MTTF) - valor esperado da variável aleatória na distribuição de probabilidade encontrada para Sistemas/unidades não reparáveis;

- *Mean Time Between Failure* (MTBF) - valor esperado da variável aleatória na distribuição de probabilidade encontrada para Sistemas/ unidades reparáveis.

São elementos que influenciam o resultado na definição das funções características da confiabilidade:

1. a diversidade de abordagens para selecionar um modelo matemático e estimar seus parâmetros;
2. a diversidade de fatores que influenciam os resultados do modelo matemático, como, por exemplo, o perfil da amostra obtida;
3. a complexidade dos sistemas industriais, com muitos subsistemas e componentes que podem ter fatores causais diversos para um mesmo modo de falha;
4. a variação do ambiente em que os sistemas operam;
5. a variação de fatores na operação do sistema (qualidade da matéria prima, oscilações da alimentação de energia, etc.);
6. restrições processuais para acompanhar um grande número de equipamentos de forma a gerar dados que sejam úteis nas avaliações da confiabilidade mesmo com os atuais sistemas computacionais;
7. a dificuldade em estabelecer, em longo prazo, uma padronização das nomenclaturas das falhas dos equipamentos, devido às mudanças tecnológicas e organizacionais nas indústrias.

2.1.3 Modelos Matemáticos probabilísticos

Em avaliações de confiabilidade de sistemas, o *Time Between Failures* (TBF) é usado como uma variável independente para obter uma Função de Falha cumulativa ($F(t)$) e sua função de Confiabilidade ($R(t)$). Para fazer previsões, é preciso escolher uma função de confiabilidade, selecionando um modelo matemático que melhor descreva um certo modo de falha, representado pelo conjunto TBF e a estimativa dos parâmetros da função.

Alguns autores (LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009; LINDQVIST, 2006) chamam a atenção para as diferenças entre modelar sistemas reparáveis e não-reparáveis. A distinção entre estes sistemas é uma decisão da política de manutenção de ativos da empresa, em função do nível de reparação definido pela capacidade de atendimento. Como exemplo, uma bomba para elevação de um sistema de água pode ser tratada como não-reparável porque a empresa simplesmente troca e descarta a mesma, já em outra empresa que usa o mesmo modelo do equipamento, as ações de manutenção podem prever um reparo no motor

elétrico ou no rotor da bomba antes de descartá-la. Os autores que diferem a modelagem destes cenários tratam os não-reparáveis baseados em distribuições de probabilidades, enquanto os reparáveis usam processos estocásticos pontuais. Neste trabalho será adotado o mais usual dos processos que é o de que os dados obtidos podem determinar uma distribuição de densidade de probabilidade contínua. Quando os dados são detalhados nos níveis de elementos substituíveis dos equipamentos, é razoável adotar a premissa da densidade de probabilidade contínua.

Portanto, esta seção inclui uma lista dos modelos matemáticos das funções densidades de probabilidade que serão usados neste trabalho. A seção também descreve o processo para selecionar um modelo matemático a partir de um conjunto de eventos amostrais.

A seleção de modelos apresentada tomou como premissa os modelos mais encontrados na literatura consultada nas avaliações de confiabilidade de sistemas e de confiabilidade humana.

Foram identificados os desdobramentos de modelos matemáticos em outros que representam melhor situações específicas, como é o caso do modelo do matemático Weibull (WANG; RAUSAND, 2014), o qual possui mais de 50 funções derivadas do original (RAUSAND; HSYLAND, 2004b), algumas delas aumentando o número de citações atualmente, como a Weibull mista (JIANG; KECECIOGLU, 1992) e a q-weibull (ASSIS et al., 2015). Neste trabalho não foram avaliadas soluções com estes modelos derivados, apenas as propostas originais, pois foram encontrados nos estudos de casos bons ajustes das curvas.

2.1.3.1 Distribuições contínuas

Nesta seção são apresentados alguns modelos matemáticos dentre os mais usados entre analistas de confiabilidade de sistemas. É relevante informar que apenas as formulações originais são apresentadas, sem a preocupação de abranger os desdobramentos destes modelos com a inclusão de mais parâmetros.

Normal

$$f(t|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Exponencial

$$f(t|\lambda) = \lambda \exp^{-\lambda t}$$

Weibull

$$f(t|\beta, \eta, \gamma) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2.1)$$

Log-Normal

$$f(t|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Log-logística

$$f(t|\beta, \eta) = \frac{\frac{\eta}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\eta-1}}{\left(1 + \left(\frac{t}{\beta}\right)^\eta\right)^2} \quad (2.2)$$

Gamma

$$f(t|\beta, \gamma, \Gamma) = \frac{1}{\beta\gamma\Gamma(t)} \int_0^t y e^{-\frac{t}{\beta}} t^{\gamma-1} dt \quad (2.3)$$

em que: γ é o parâmetro de forma (adimensional), β o parâmetro de escala, Γ o símbolo da função gama e t a variável.

2.1.3.2 Distribuições de probabilidades discretas

Poisson

$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2.4)$$

na qual O parâmetro λ indica a taxa de ocorrência por unidade medida.

Binomial

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad (2.5)$$

na qual n é o número de eventos, k é o número de sucessos, p é a probabilidade de sucesso e o coeficiente binomial é dado pela Eq.2.6:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (2.6)$$

A Tabela 1 trata as distribuições quanto as suas características, premissas e aplicações ao contexto deste trabalho.

Tabela 1 – Distribuições de probabilidades contínuas mais usadas na confiabilidade, suas premissas e aplicações - parte 1

Modelo	Premissas/ Características	Objetivos / Aplicações	Referências
Gauss	Assimetria é zero, a média, a mediana e a moda tem mesmo valor	A variável aleatória normal é caracterizada por possuir uma taxa de falha crescente com o tempo e, segundo Nelson (1982), ela deve ser apropriada para modelar a vida de produtos em que as falhas são causadas pela idade. É usada na análise de manutenibilidade, com distribuição de tempos de reparos padronizados e com baixa complexidade (por exemplo: reparos pós acidente de veículos de passeio).	MONTGOMERY and RUNGER, 2010; O CONNOR and KLEYNER, 2012; BIROLINI, 2014; JULA and PRAPORGESCU, 2012
Exponencial	A constante λ é um valor sempre positivo. A medida de tendência central (média) é igual à medida de dispersão em torno do centro (desvio padrão).	O tempo de operação acumulado afeta a probabilidade de falha futura. Possui a propriedade de falta de memória.	MONTGOMERY & RUNGER, 2010;
Lognormal	O desvio padrão determina o formato da curva. A média determina a dispersão e a localização da curva.	Para a modelagem de vida de componentes e sistemas submetidos a diferentes modos de falha, já que para valores iguais de média o desvio padrão determina a forma. Aplicada a distribuição de Probabilidade de Erros. Humanos (HEP) para tarefas complexas, mas conhecidas. Aplicada a análise de manutenibilidade para serviços complexos (duração do tempo de reparo).	Swain & Guttman (NUREG)Hussin et al. (2013), Tsarouhas (2015)

Tabela 2 – Distribuições de probabilidade contínuas mais usadas em confiabilidade, suas premissas e aplicações - parte 2

Modelo	Premissas/ Características	Objetivos / Aplicações	Referências
Log-Logística	É a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória cujo logaritmo tem uma distribuição logística. É semelhante em forma à distribuição log-normal, mas tem caudas mais concentradas.	É utilizada na análise de sobrevivência como modelo paramétrico para eventos, nos quais a taxa aumenta inicialmente e diminui posteriormente. O fato de que a função de distribuição cumulativa pode ser escrita na forma fechada é particularmente útil para a análise de dados de sobrevivência com censura. A distribuição log-logística pode ser usada como base para um modelo de tempo de falha acelerado, introduzindo co-variáveis que afetam o parâmetro de forma, mas não o parâmetro de escala pela modelagem o log α (parâmetro de forma) como uma função linear das co-variáveis.	BENNETT, 1983; CORDEIRO et al., 2017; KORKMAZ et al., 2019; PRATAVIERA et al., 2018
Weibull	Uma distribuição que possui grande versatilidade, capaz de assumir diversas formas. A equação original limita sua função taxa instantânea de falha a ser sempre monotônica qualquer que sejam os valores dos seus parâmetros, podendo ser crescente ou decrescente.	A modelagem original foi desenvolvida em um estudo sobre mecânica dos sólidos para mecanismos de falha por fadiga e fluência, e é aplicada em diferentes setores quando o tempo de vida é uma variável determinante. Possui muitas variações incluindo novos parâmetros usadas para dar maior versatilidade	DODSON; NOLAN, 1999; KECECI- OGLU, 2002; ASSIS et al., 2019
Gama		Versatilidade. Aplicada para modelagem de vida de componentes com valores extremos, ou seja, casos de variável aleatória com valores assimétricos. Tem a capacidade das suas distribuições modificadas para modelar diferentes padrões de taxa de falha, que as tornam alternativas na busca de uma distribuição que represente fielmente a aleatoriedade de um conjunto de dados. Tem aplicação em conjunto com uma análise Bayesiana na modelagem de riscos competitivos em sistemas de confiabilidade.	MONTGOMERY & RUNGER, 2010; YNOGUTI, 2011; PHAM, 2006; O CONNOR & KLEYNER, 2012 Krishnamoorthy et al. (2012); Jain et al. (2014) Noufaily & Jones (2013) Iskandar (2016)

Tabela 3 – Distribuições de probabilidades discretas mais usadas na confiabilidade, suas premissas e aplicações

Modelo	Premissas/ Características	Objetivos / Aplicações	Referências
Poisson	Como distribuição discreta é aplicada a eventos independentes, em que a probabilidade de ocorrência em um intervalo não afeta a probabilidade no próximo intervalo. Valor esperado e variância são constantes e iguais. A probabilidade de ocorrência de um evento é proporcional ao tempo de observação.	A simplicidade tem sido a maior razão para aplicação em análises de confiabilidade. As aplicações são : identificação da frequência de falhas para um dado intervalo de tempo, após ter sido definida uma distribuição para a confiabilidade, e no dimensionamento de estoques para uma família de equipamentos dada uma taxa de falhas constante.	DODSON; NOLAN, 1999; DODSON; SCHWAB, 2006
Binomial	Há um número fixo de eventos ou observações (n). Os n eventos são todos independentes, o conhecimento sobre um nada nos diz sobre os outros. Cada evento pode assumir apenas um estado, na confiabilidade seria Sucesso ou Falha. A probabilidade de Sucesso p é a mesma em todas as observações.	Como as curvas da função confiabilidade representam o Sucesso em estar operacional, a probabilidade p representa a confiabilidade em um determinado tempo t . Em um conjunto de n elementos iguais, pode-se saber a probabilidade de que k estejam funcionando no tempo t . Aplicado ao dimensionamento dos sobressalentes a serem alocados no estoque.	MOORE, D., 2000; PHAM, 2006; DODSON; SCHWAB, 2006; KECECIOGLU, 2002

2.1.4 Coleta de dados para análises de Confiabilidade e as causas de incoerências

A premissa (ii) da subseção 2.1.1 foi apresentada como uma das opções para modelagem da confiabilidade de sistemas e assume que uma nova condição operacional pode ser estabelecida em uma troca de componentes de um sistema (as informações históricas não são consideradas as mesmas). Esta premissa para o contexto operacional em uma indústria, por exemplo, não está sob o rígido controle de um experimento em laboratório e outras variáveis podem intervir no processo. Nem sempre é possível precisar quanto tempo efetivamente o sistema esteve em operação, pois existe apenas um registro do início da operação e o conhecimento do tempo decorrido, em calendário, até que a falha ou parada do sistema tenha ocorrido. A carga do sistema também não é registrada nos bancos da manutenção e pode variar a cada turno de trabalho.

O lançamento dos dados e a listagem dos modos de falha associados precisam existir de uma forma estruturada ou ocorrerá uma diversidade de informações para as mesmas condições causais. As variáveis coletadas durante a realização de um processo precisam representar a realidade na ocorrência dos eventos e devem ser registradas de forma confiável. Todas as ações da engenharia de confiabilidade e os desdobramentos das análises de riscos de sistemas industriais dependem da consistência dessas informações registradas.

Ressalta-se que as inconsistências em um processo de coleta de dados para registro de uma falha são causadas por vários fatores, incluindo-se alguns que são considerados como organizacionais (LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009; PRASAD; M., 2002; RAUSAND; HSYLAND, 2004b). No exemplo mostrado na Figura 1, é possível observar que os registros podem ser lançados de uma forma incoerente em uma análise de causas já sistematizada. Isso ocorre devido aos desdobramentos existentes na árvore estabelecida para o cadastro do equipamento nos sistemas computacionais de manutenção.

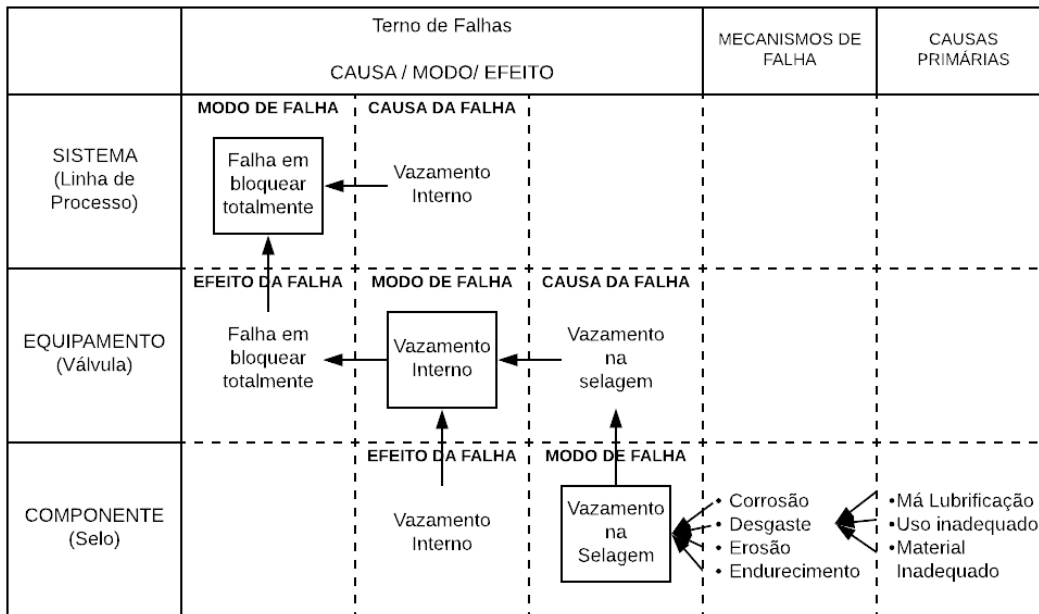


Figura 1 – Desdobramento de níveis dos ternos de falha (Adaptado de RAUSAND, 1998)

Como verifica-se na Figura 1, os desdobramentos criam muitos níveis onde se pode realizar os registros dos modos e causas das falhas. Portanto, essa estrutura permite que uma falha venha a ser registrada com muitos modos de falha, devido a causas diversas, simplesmente porque cada nível registrará as suas próprias conclusões.

As causas de incoerências nos dados podem ser classificadas de acordo com os seguintes fatores:

- contextuais - relacionados à configuração física do sistema e ao ambiente de aplicação;
- organizacionais - relacionados aos processos das empresas e a infra-estrutura disponível;
- conjunturais humanos - relacionados às definições dos conceito de falha, padronização de termos relacionados e da qualificação das equipes quanto ao entendimento das teorias de confiabilidade.

É relevante observar que Os fatores organizacionais influenciam nas outras classes citadas acima. Estes fatores são associados ao momento em que são realizados os registros, tais como:

- o formato dos setores organizacionais da manutenção (oficina, seções de reparos, fornecedores, laboratórios);

- a capacidade tecnológica utilizada para analisar a falha em cada nível organizacional (pode ser avaliada com base na disponibilidade de testes, ensaios ou equipamentos de análise que possibilitem a identificação da causa);
- o nível de reparo (sistema, componente, peça ou item da peça) derivando, a cada situação, num registro de falha diferente para um mesmo evento (exemplos: Motor diesel aceleração instável, Governador do Motor oscilando na marcha lenta, solenoide comandando aleatoriamente);
- os modelos organizacional e de infraestrutura da manutenção (exemplos: manutenção centralizada ou distribuída nas áreas produtivas ou regiões, existência de oficinas de itens recuperáveis, política de terceirização de fornecedores para recuperação de equipamentos, componentes ou peças);
- o tipo de ação de reparo. O reparo da peça pode ocorrer no local, pode haver a substituição de um item recuperável, ou a substituição de uma peça, por exemplo.

Os fatores contextuais de configuração do sistema levaram em consideração situações em que há equipamentos em *stand – by*, equipamentos os quais estão ligados às paradas de outros no mesmo sistema pelo sistema de automação (equipamentos ligados em série em que oscilações podem desencadear falhas e as causas são externas ao mesmo). Também foram consideradas as formas como são registrados os tempos e os momentos dos eventos de falha, nem sempre monitorados por sistemas informatizados.

O ambiente físico da aquisição dos dados também deve ser considerado no fator contextual, não só as condições constantes (exemplos: sempre submetido a vibração; sempre sob proteção física do ambiente, como uma cobertura) como as que variam com tempo (exemplos: chuva, inundação, sol constante, vapores ácidos do processo).

Sobre os fatores conjunturais humanos, podem ser considerados os aspectos:

- capacidade humana em analisar as causas e os fatores, relacionado à competência e à limitação técnica da equipe;
- erros de seleção na alocação das expressões relacionadas aos modos, efeitos e causas das falhas (os termos de falha) durante a seleção na lista de termos disponibilizada nos softwares de manutenção;
- alocação incorreta sistemática das expressões de modos, efeitos e causas das falhas, por causa de falta de padronização na equipe técnica ou por pressão do tempo para realizar a tarefa.

Em princípio, apenas o último aspecto poderia ser desconsiderado, os outros, pelo caráter aleatório dos dados, demandariam experiência do analista e tempo para serem identificados, além de uma amostra com muitos dados.

Como exemplo da dificuldade em extrair dados completos para uso nas análises de confiabilidade, foi apresentado por FIGUEIRÔA, ASSIS, JORDI (2017) um conjunto de exemplos sobre os registros de falhas de um sistema de bombeio de esgotos urbanos. A Tabela 4 apresenta um quadro com os resultados de parâmetros para distribuições de Weibull de alguns modos de falha do sistema elétrico de alimentação das bombas.

Modo de Falha	β	θ (min)	t_0	R^2
Painel elétrico	0,696	37371,7	-334,9	0,9857
Fusível queimando	0,636	108206,3	2461,1	0,9889
Curto Circuito	0,230	5492,9	1,3	0,9558
Problemas elétricos	0,264	641930,0	2671,2	0,8702

Tabela 4 – Resultados dos parâmetros da distribuição de Weibull por Modo de Falhas (MF) do sub-sistema elétrico (Fonte: FILHO C L S FIGUEIRÔA, 2017)

Verifica-se na Tabela 4 que, conforme os modos de falha vão sendo registrados de forma mais genérica (exemplo: curto circuito e problemas elétricos), o ajuste vai piorando (visto aqui no indicador R^2). Da mesma forma, nota-se que o parâmetro de forma da distribuição de probabilidades também fica muito diferente dos modos de falha mais específicos como o painel elétrico (expressão padronizada na empresa para informar que a falha se apresentou no aterramento ou nas conexões) e "fusível queimado". No caso do modo de falha "painel elétrico" o parâmetro de localização (t_0) torna-se negativo, indicando que (i) a falha pode ocorrer antes de iniciar a operação ou (ii) que existem muitos modos de falha, se não (iii) porque muitas das causas foram registradas sob uma mesma expressão.

Registros feitos conforme o exemplo são encontrados com frequência nas empresas e acabam não sendo úteis para tomadas de decisões importantes. Uma pequena melhora na forma de registrar como informar o elemento substituível (fusível) e qual o modo de falha que ocorreu (queimado) já levou a resultados melhores. Entretanto, os registros podem ter sido feitos por alguém que não tinha disponível os recursos para garantir que a causa foi o fusível queimado, pois a perda do fusível pode ter sido causada por um fator externo ao componente e, portanto, ele apenas foi o efeito.

2.1.5 Processo para definição da Função Confiabilidade

A engenharia de confiabilidade desenvolve as avaliações probabilísticas de falhas passando por várias etapas de decisão. A Figura 2 apresenta o fluxo de processo para a primeira etapa da realização de uma análise de confiabilidade de um sistema.

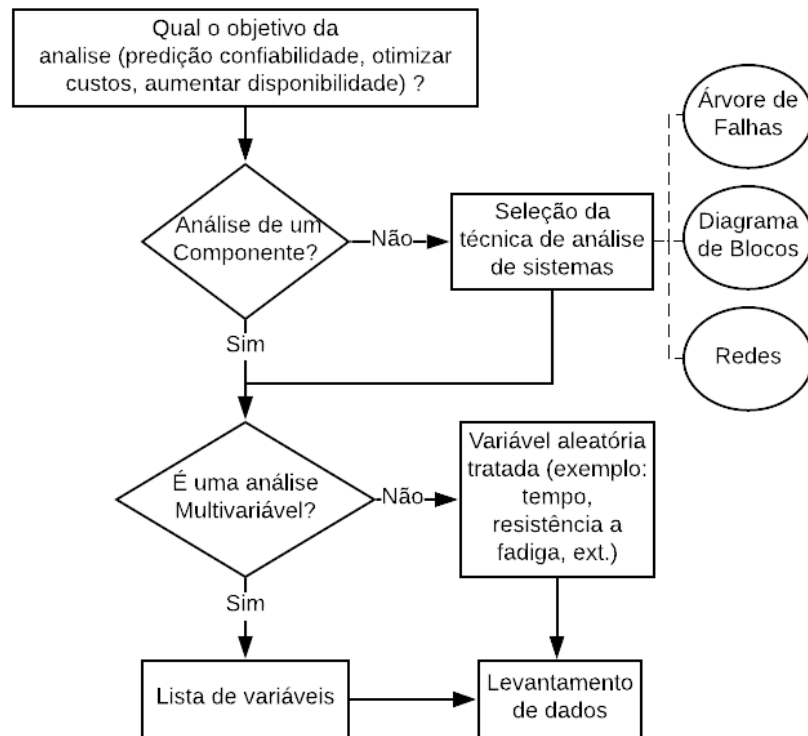


Figura 2 – Resumo do processo de análise da confiabilidade - Etapa 1 (Fonte: Próprio Autor)

Observa-se que, na Figura 2, há uma declaração mais detalhada dos objetivos a serem alcançados com a análise da confiabilidade. Um objetivo é saber a probabilidade de um componente em operar sem falhas, um outro é um conjunto de componentes que operam como um sistema se comporta quando falhas ocorrem. Portanto, pode-se aumentar a confiabilidade de cada um dos componentes ou combiná-los de forma a que a falha leva a outro componente assumir a função sem detrimento do desempenho esperado da operação.

O fluxograma apresentado na Figura 2 não determina uma única sequência para uma análise de confiabilidade, mas é coerente com as referências consultadas como uma etapa inicial (STEVENS, 1993; RAUSAND; ØIEN, 1996; WECKMAN; SHELL; MARVEL, 2001; RAUSAND; HSYLAND, 2004b; DODSON; NOLAN, 1999). O próximo passo é obter os dados para uma amostra de entrada da análise. Em sequência, a Figura 3 apresenta a etapa de separação dos dados.

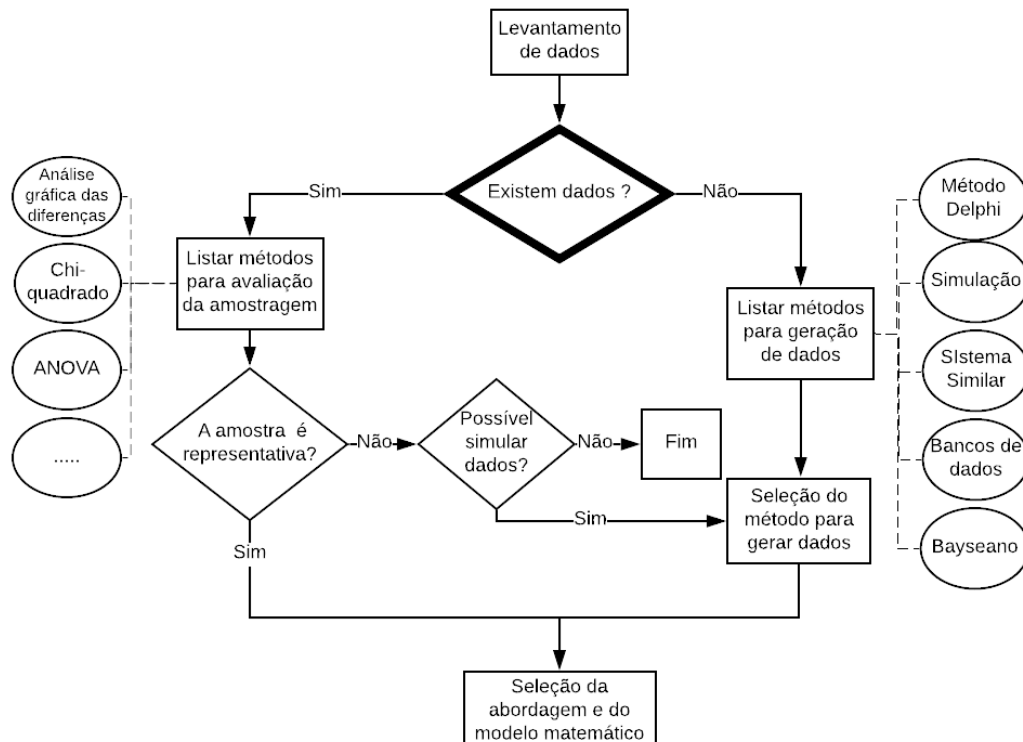


Figura 3 – Resumo do processo de análise da confiabilidade de sistemas - Etapa 2: amostragem. (Fonte: Próprio Autor)

Nota-se na Figura 3 que a definição da amostra tem dois caminhos principais: (i) validar a amostra obtida, (ii) desenvolver os dados por simulação para tornar a amostra significativa e representativa do fenômeno em estudo.

A próxima etapa caminha para definir a abordagem a ser usada para a estimativa da distribuição de probabilidade e dos seus parâmetros, além da identificação dos modelos matemáticos possíveis para a função confiabilidade.

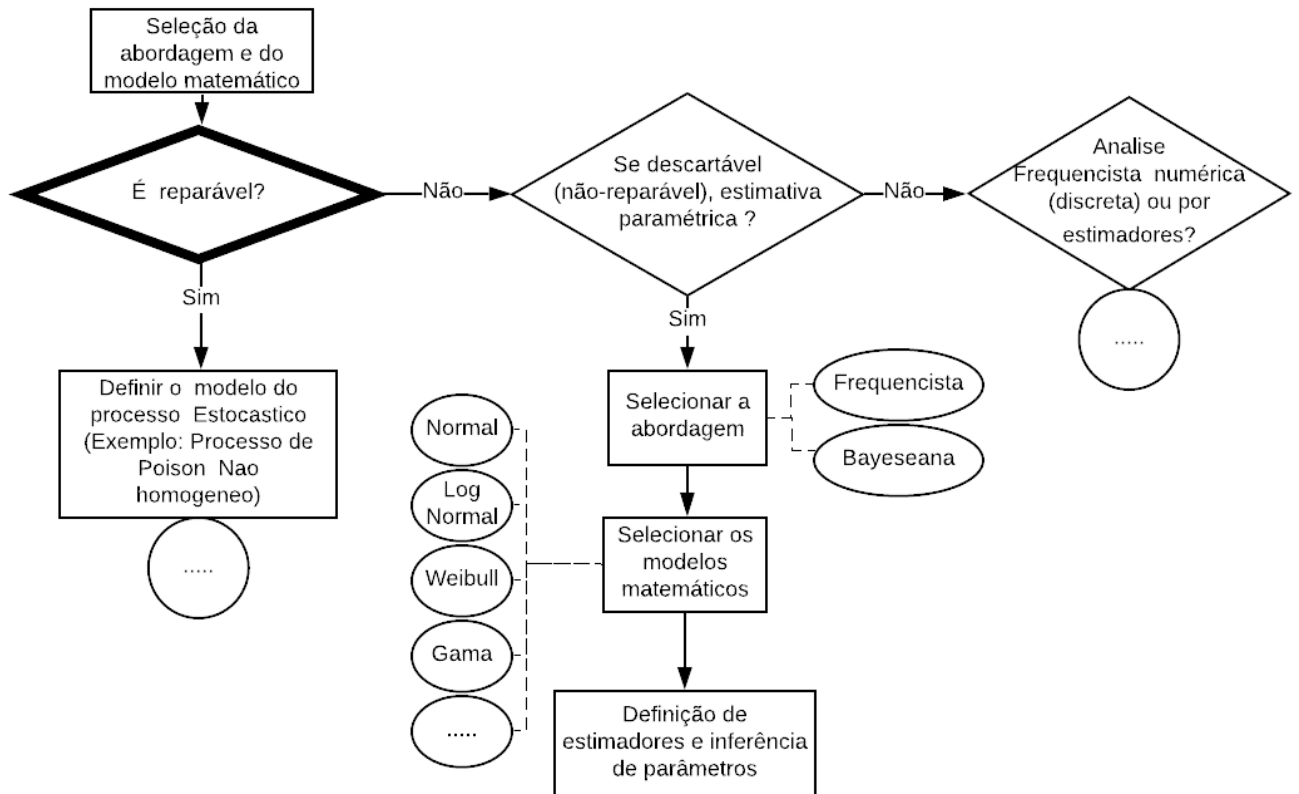


Figura 4 – Resumo do processo de análise da confiabilidade de sistemas - Etapa 3: abordagem e modelos matemáticos. (**Fonte:** Próprio Autor)

A lista de modelos matemáticos pode incluir novos modelos ainda não descritos nas referências bibliográficas, como os citados no fluxograma. Em geral a limitação para aplicação de modelos é o conhecimento já estabelecido sobre os resultados para a função confiabilidade.

Nas estimativas das funções contínuas, adota-se a premissa do componente ser substituído e um novo ser instalado (condição chamada *as good as new*), mesmo quando o que ocorre é um reparo do componente ou do equipamento e o retorno à operação. Alguns autores consideram que o reparo estabelece uma nova condição e o histórico não pode ser usado levando em consideração a mudança de condição (RAUSAND, 2011; LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009; PRASAD; M., 2002; WECKMAN; SHELL; MARVEL, 2001; LINDQVIST, 2006), por este motivo, o fluxo proposto inicia com o questionamento da condição reparável ou não.

O próximo momento da análise é composto por (i) definir o uso de estimadores e quais, (ii) formulação da função a ser otimizada para estimativa dos parâmetros do modelo matemático, (iii) selecionar os critérios de aceitação do ajuste na estimativa dos parâmetros da função escolhida e (iv) a definição do processo de otimização que será usado.

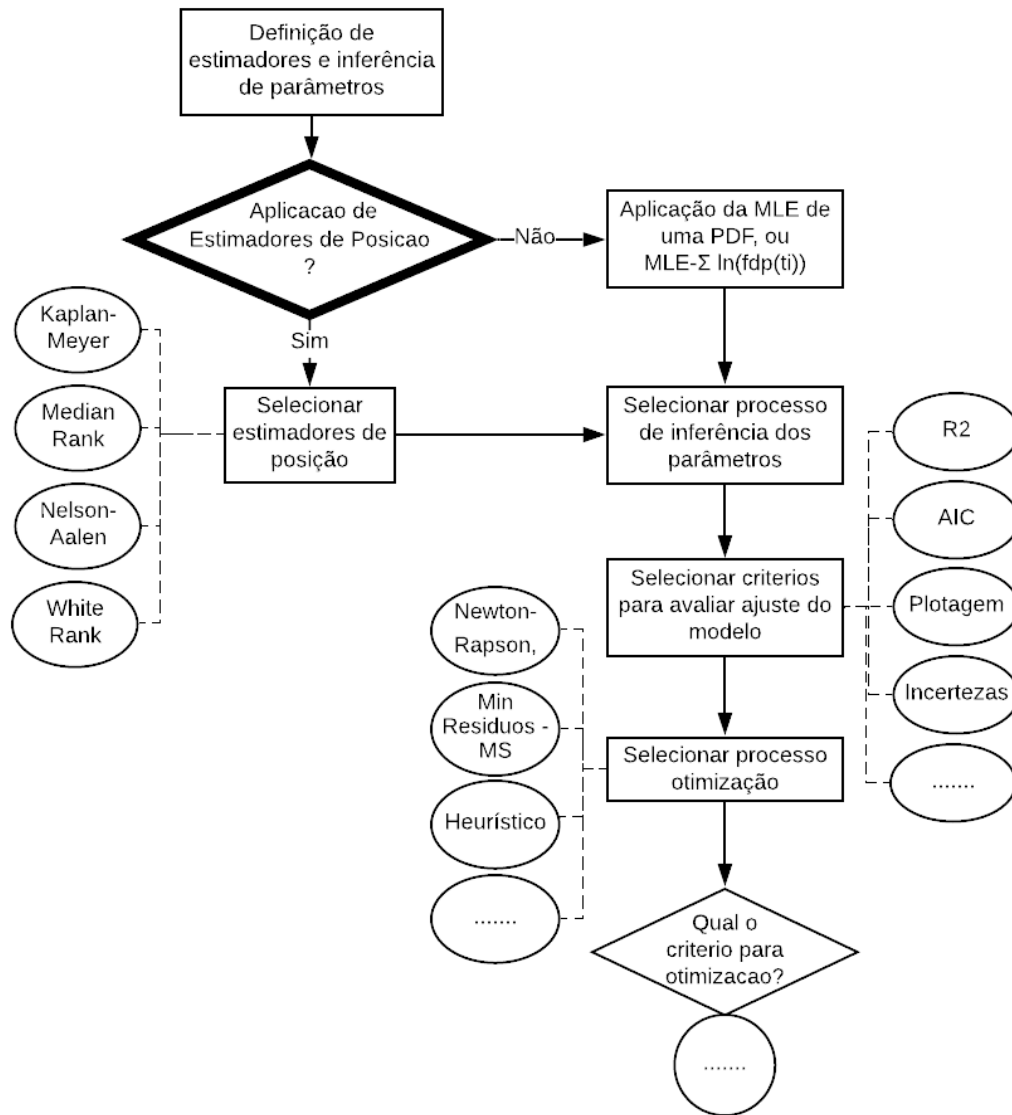


Figura 5 – Resumo do processo de análise da confiabilidade de sistemas - Etapa 4: uso de estimadores, formulação da função a ser otimizada, seleção de critérios de aceitação da estimativa dos parâmetros e processo de otimização (**Fonte:** Próprio Autor)

Ressalva-se que o processo descrito não esgota todas as atividades de uma análise de confiabilidade de sistemas. Além disso, o uso de ferramentas computacionais que aceleram todo o processo não elimina os pontos de tomada de decisão apresentados. Portanto, uma análise de confiabilidade da separação dos dados até a estimativa dos parâmetros é um processo que demanda muitos momentos de decisão para o engenheiro de confiabilidade. Qualquer escolha indevida pode levar às previsões que serão feitas a perdas de montantes significativos, incluindo, em alguns casos, vidas humanas.

As subseções seguintes revisam com maior detalhamento algumas das etapas mais críticas e que requerem um aprofundamento no conhecimento do analista e de sua disciplina para relembrar continuamente as premissas adotadas quando os resultados são obtidos.

Demonstra-se, desta forma, um quadro onde a complexidade do processo tende à tomadas de decisões inadequadas.

2.1.6 Seleção dos modelos matemáticos para a função confiabilidade

Modelos matemáticos são construídos para representarem fenômenos. A cada distribuição de probabilidades conhecidas temos uma identificação com os eventos que pretende definir. Assim o modelo da Gaussiana tem a intenção de informar que as possíveis respostas vão estar distribuídas em torno de uma média que também coincide com a o valor mais repetido e também com a sua mediana. Um Binomial informa que temos apenas duas saídas possíveis. Distribuições como a de Weibull, a Gama ou mesmo polinomiais podem representar vários tipos de fenômenos.

Portanto, o primeiro passo para a seleção de um modelo pode ser por conhecer o fenômeno, ou pode ser por aceitar o que os dados podem lhe levar a concluir, e escolher a partir de uma lista de modelos conhecidos.

2.1.6.1 Abordagens para seleção do Modelo

O processo para selecionar um modelo que melhor descreve um determinado modo de falha por um ponto de vista clássico de inferência estatística é comparar os dados com o modelo mais adequado. A melhor estimativa de parâmetros e suas incertezas associadas podem ser obtidas por técnicas baseadas em paradigmas freqüencistas (clássicos) ou bayesianos. Cada paradigma tem seu próprio conjunto de técnicas para realizar a estimativa de parâmetros. Algumas técnicas de inferência estatística clássica comumente usadas para análise de confiabilidade são: estimação por máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation* - MLE) (RAUSAND; HSYLAND, 2004a; JIANG; KECECIOGLU, 1992; ELMAHDY; ABOUTAHOUN, 2013a; ALMALKI; YUAN, 2013), Mínimos Quadrados (*Least squares* - LS) (MURTHY; BULMER; ECCLESTON, 2004a; RAUSAND; HSYLAND, 2004a; ZHANG; XIE; TANG, 2007), Mínimos Quadrados Ponderados (*weighted least squares* - WLS) (JUKIĆ; BENŠIĆ; SCITOVSKI, 2008a), ou análise gráfica. MLE pressupõe a maximização da probabilidade de dados, que é o produto da função de densidade do modelo proposto. O LS minimiza a diferença entre um estimador de confiabilidade não paramétrico e o modelo proposto, chamado residual. O WLS funciona de forma semelhante ao LS, mas pesa cada residual.

Para encontrar os valores dos parâmetros do modelo escolhido, precisamos dos valores da função em cada ponto. Como cada evento de falha é único, cada um sendo uma amostra, é necessário, por meio de um estimador inicial, obter $F(t)$. São estimadores não-paramétricos o Mean Rank (abordagem por Nelson Aalen), Median Rank (Barnard approach) e Kaplan-Meyer (MURTHY; BULMER; ECCLESTON, 2004a; RAUSAND;

HSYLAND, 2004a; LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009). As equações 2.7, 2.8 e 2.9 se referem ao estimadores Mean Rank, Median Rank, White Rank respectivamente.

$$F_i = \frac{i}{(N + 1)} \tag{2.7}$$

$$F_i = \frac{(i - 0,3)}{(N + 0,4)} \tag{2.8}$$

$$F_i = \frac{i - 3/8}{n + 1/4} \tag{2.9}$$

F_i é a i -ésima função de falha acumulada em uma posição ordenada ascendente de uma escala normalizada e N é o número de Tempo Entre Falhas disponível como amostras da análise do sistema. A partir das estimativas dos valores $F(t)$ em cada ponto, estes se tornam as referências para a estimação dos parâmetros dos modelo matemático selecionado. Este processo é bem estabelecido e pode ser encontrado em livros e nas revisões de artigos sobre confiabilidade de sistemas (RAUSAND; HSYLAND, 2004b; DODSON; NOLAN, 1999; ELMAHDY; ABOUTAHOUN, 2013b).

Em algumas amostras a repetição dos valores leva os estimadores por ranking a apresentarem valores com saltos nos gráficos. O modelo proposto por Kaplan-Meyer (JIANG; KECECIOGLU, 1992) se ajusta melhor aos pontos neste caso e a Eq. 2.10 calcula o estimador.

$$R(t) = \prod \frac{n_i - d_i}{n_i} \tag{2.10}$$

onde $R(t)$ é a função confiabilidade, n_i é a i -ésimo amostra de Tempo Entre Falhas no tempo t_i e d_i é número falhas no tempo t_i . Nesse caso

Em geral, os analistas testam todos os estimadores e adotam o que apresentar o melhor ajuste para o modelo matemático a selecionado.

2.1.6.2 Estimativa dos parâmetros dos modelos das funções

Dado que podemos ter para um mesmo modelo matemático várias combinações possíveis dos os parâmetros que atendam as condições formuladas, qual a que melhor atende o fenômeno que se pretende representar? Qual o conjunto de parâmetros que representa o fenômeno demonstrado a parti de uma amostra levantada?

O processo de estimar os parâmetros de um modelo matemático conhecido, e saber se ele é capaz de representar bem o fenômeno encontrado, serve para responder a estas questões.

As abordagens para a estimação dos parâmetros da função de falhas de equipamentos podem ser:

1. pelo cálculo da Máxima Verossimilhança sobre a função densidade de probabilidade (JIANG; KECECIOGLU, 1992; ELMAHDY; ABOUTAHOUN, 2013a),
2. por um processo de otimização da função acumulada de falhas com a minimização dos resíduos (JUKIĆ; BENŠIĆ; SCITOVSKI, 2008b),
3. por uma modificação de variáveis usando os logaritmos da função e usando a equação de uma reta obtida graficamente, minimizando os dados pelo ajuste dos mínimos quadrados (JIANG; KECECIOGLU, 1992; ZHANG; XIE; TANG, 2007; JUKIĆ; BENŠIĆ; SCITOVSKI, 2008b),
4. por um aprimoramento do método anterior realizando o ajuste dos mínimos quadrados ponderado pela variância das amostras (ZHANG; XIE; TANG, 2007),
5. por uma busca usando um método heurístico com a minimização da função de verossimilhança (BENIDRIS; ELSAIAH; MITRA, 2015; MITRA; XU, 2010),
6. Por inferência bayeseana partindo de uma distribuição com variância a priori e usando a função de verossimilhança da distribuição desta variância (SANTANA et al., 2018).

2.1.6.3 Critérios de avaliação dos ajustes aos modelos (*goodness of fit*)

Os índices da qualidade do ajuste são usados para avaliar se o modelo descreve o fenômeno a partir de um conjunto de dados ou para comparar modelos diferentes. A prática comum é selecionar como o melhor modelo aquele que obteve à melhor estimativa do índice usado. Lawless (LAWLESS, 2003) aponta que estes testes indicam apenas uma falta de ajuste, portanto, a questão fundamental, geralmente, é se um modelo se aproxima bastante dos fenômenos reais para propósitos práticos. Neste trabalho foram utilizados dois índices: o coeficiente de determinação (R^2) e o AIC - Akaike Information Criteria. Estes critérios foram escolhidos porque aparecem citados em todas as referências consultadas sobre análise quantitativa da confiabilidade (ALMALKI; YUAN, 2013; ELMAHDY; ABOUTAHOUN, 2013a; LOUIT; PASCUAL; JARDINE, 2009).

O coeficiente R^2 é calculado pelo método dos mínimos quadrados, e sua formulação é descrita na Equação 2.11.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum [y_i - \hat{y}_i]^2}{\sum [y_i - \bar{y}_i]^2} \quad (2.11)$$

onde \hat{y}_i é $\ln \left\{ -\ln \left[1 - \hat{F}(t_i) \right] \right\}$ para distribuição de Weibull, \bar{y}_i é $\frac{\sum y_i}{n}$, onde n é o tamanho da amostra.

O AIC (ALMALKI; YUAN, 2013; HURVICH; TSAI, 1989) é um índice que pode suportar a decisão de comparar modelos, mas de diferentes quantidades de parâmetros. Existem muitos ajustes para o AIC, neste trabalho será usado o proposto por Hurvich e Tsa (HURVICH; TSAI, 1989) e sua formulação é descrita na Equação 2.12.

$$AIC = n \ln \left\{ \frac{\sum [\hat{F}(t) - F(t)]^2}{n} \right\} + 2K + \frac{2K + (K + 1)}{n - K - 1} \quad (2.12)$$

onde K é o número de parâmetros do modelo matemático.

O melhor ajuste será o menor valor do AIC entre os modelos matemáticos analisados.

A Tabela 5 complementa com um resumo de índices de ajuste encontrado nos trabalhos sobre a engenharia de confiabilidade, e suas aplicações mais comuns. Foram listadas na Tabela 5 os tipos de aplicações mais encontradas nas referências pesquisadas para cada um dos índices de ajuste, que são: (i) seleção do modelo matemático, (ii) comparação entre técnicas para estimar os parâmetros dos modelos, (iii) verificação da qualidade do modelo, (iv) aplicação como critério para a comparação de famílias de distribuições de Weibull.

Tabela 5 – Índices de qualidade do ajuste (*Goodness of fit-GOF*) aplicados a análise de confiabilidade e exemplos do seu uso (adaptado de SANTANA et al., 2018)

Índices	MLE	LS	WLS	Aplicação
Kolmogorov-Smirnov	x			seleção do modelo
Coefficiente de determinação (R^2)	x	x		comparação de técnicas família Weibull
Akaike (AIC)	x	x		seleção do modelo família weibull
Mean square error dos resíduos		x		seleção do modelo comparação de técnicas qualidade do modelo
Maximum residual error	x	x		família weibull seleção do modelo qualidade do modelo
Average residual error	x	x		família weibull seleção do modelo
Residual mean	x	x	x	comparação de técnicas seleção do modelo
Residual variance	x	x	x	comparação de técnicas seleção do modelo
Percentis dos resíduos	x	x		seleção do modelo
Predição do p -valor			x	qualidade do modelo

O processo de escolha dos indicadores pode ser exemplificado pelos trabalhos de: MURTHY; BULMER; ECCLESTON, 2004b, ZHANG; XIE; TANG, 2007, ZHANG; DWIGHT, 2013, PENG; YAN, 2014, GUO; MONAS; GILL, 2014, AL-GARNI; JAMAL, 2011, CASTET; SALEH, 2010, DUBOS; CASTET; SALEH, 2010 e KHOSHGOFTAAR; WOODCOCK, 1991.

Em SANTANA et al., 2018 foram avaliados outros autores que consideraram a incerteza na predição do modelo, como: (i) Upadhyay et al. (UPADHYAY; VASISHTA; SMITH, 2000) e Gupta et al. (GUPTA; MUKHERJEE; UPADHYAY, 2008) usaram a predição Bayesian do p -valor para avaliar o modelo; e (ii) Iesmantas e Alzbutas (IESMANTAS; ALZBUTAS, 2016) avaliaram os limites inferior e superior de 95% de dois modelos para comparar suas capacidades de previsão.

2.1.7 Avaliação da Incerteza

Como a separação dos dados de sua incerteza é sempre impossível, é essencial propagar as incertezas dos parâmetros através do modelo proposto para suas previsões, como a confiabilidade, taxa de risco, função de densidade. Como resultado, não apenas as previsões

devem ser calculadas para os parâmetros mais adequados, mas também os intervalos de cobertura de cada valor previsto devem ser avaliados para descrever a incerteza do modelo.

Obtida a *Probability Density Function* (PDF) como um estado de conhecimento sobre os parâmetros do modelo definido, será possível saber qualquer momento estatístico desta distribuição. Em particular, os momentos de primeira e segunda ordem da distribuição são úteis na análise de confiabilidade, descrevendo as médias dos parâmetros (vetor de expectativa) e sua incerteza associada (matriz de covariância), respectivamente.

Após integrar a função de distribuição de probabilidades selecionada, m amostras são extraídas da distribuição conjunta com parâmetros q , e podem ser apropriadamente arrumadas como colunas de uma matriz $m \times q$:

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{q1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{1m} & \cdots & \theta_{qm} \end{bmatrix}_{m \times q}, \quad (2.13)$$

onde cada coluna representa uma amostra gerada a partir da distribuição marginal de um parâmetro específico. Uma consequência direta desse arranjo é que o vetor de expectativa (médias) e a matriz de covariância podem ser obtidos por:

$$\hat{\theta}_j = \frac{\sum_{l=1}^m \theta_{jl}}{m}, \quad j = 1, \dots, q, \quad (2.14)$$

$$U_{\theta\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{l=1}^m (\theta_{1l} - \hat{\theta}_1)^2}{m-1} & \cdots & \frac{\sum_{l=1}^m (\theta_{ql} - \hat{\theta}_q) \cdot (\theta_{1l} - \hat{\theta}_1)}{m-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\sum_{l=1}^m (\theta_{1l} - \hat{\theta}_1) \cdot (\theta_{ql} - \hat{\theta}_q)}{m-1} & \cdots & \frac{\sum_{l=1}^m (\theta_{ql} - \hat{\theta}_q)^2}{m-1} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Vale ressaltar que a raiz quadrada da diagonal principal da matriz de covariância representa a incerteza padrão associada aos parâmetros, enquanto os demais elementos são as covariâncias entre os pares de parâmetros, conforme estabelecido pela estrutura do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) (BIPM et al., 2008a). Se a matriz de covariância dos parâmetros, Eq. 2.15, mostra que existem parâmetros altamente correlacionados, pode-se suspeitar que o modelo não poderia representar adequadamente o conjunto de dados.

Outra propriedade importante que pode ser extraída das amostras de parâmetros é o conjunto de seus intervalos de abrangência, que podem ser obtidos da seguinte maneira:

$$\int_{\theta_i^{\min}}^{\theta_i^{\max}} p(\theta_i|t) \cdot d\theta_i = p', \quad (2.16)$$

no qual θ_i^{\min} e θ_i^{\max} são os limites do intervalo, e p' is a probabilidade da abrangência. O *Guide for Uncertainties in Measuring* (GUM) Supplement 1 (BIPM et al., 2008b) sugere um procedimento para avaliar este intervalo para funções densidade simétricas e assimétricas.

Por outro lado, esses intervalos não contêm nenhuma informação sobre as covariâncias entre os parâmetros. Essa informação é crucial quando a qualidade do modelo é avaliada, porque uma covariância significativamente grande pode revelar uma sobreposição nos eventos que cada parâmetro explica. A análise paramétrica da confiabilidade convencional não trata das regiões de abrangência. A avaliação das regiões de cobertura para cada par de parâmetros contidos no modelo de confiabilidade pode ser formulada como

$$\int_{\theta_i^{\min}}^{\theta_i^{\max}} \int_{\theta_j^{\min}}^{\theta_j^{\max}} p(\theta_i, \theta_j|t) \cdot d\theta_i \cdot d\theta_j = p'. \quad (2.17)$$

Possolo (POSSOLO, 2010) propõe um procedimento para avaliar as regiões de abrangência com área mínima, que é recomendado pela *Guide for Uncertainties in Measuring* (GUM) Supplement 2 (BIPM et al., 2011). Algumas outras discussões sobre este assunto podem ser encontradas no GUM Supplement 2 (BIPM et al., 2011; Draper and Guttman DRAPER; GUTTMAN, 1995).

Tais regiões de abrangência são úteis para abordar as correlações entre os parâmetros, isto é, a correlação paramétrica pode ser facilmente confirmada pela forma da região. Por exemplo, se existe um certo tipo de dependência entre os parâmetros, pode-se suspeitar de uma sobreposição entre o impacto de cada parâmetro nas previsões do modelo final.

Em relação às previsões e ao ajuste, suas incertezas associadas também devem ser avaliadas. Como os modelos envolvidos na análise de confiabilidade são não-lineares e a distribuição posterior conjunta dos parâmetros é conhecida, o método baseado na lei de propagação da função de densidade de probabilidade da distribuição conjunta seria fortemente recomendado, conforme proposto no GUM Supplements 1 and 2 (BIPM et al., 2008b; BIPM et al., 2011). Nesse caso, a incerteza pode ser avaliada numericamente usando o método de Monte Carlo.

Portanto, para cada tempo t_i as amostras que pertencem à distribuição empírica do modelo matemático em t_i serão avaliadas. Eles são representados em cada coluna da matriz genérica, G

$$G = \begin{bmatrix} g(t_1, \theta_{\sim 1}) & \cdots & g(t_k, \theta_{\sim 1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(t_1, \theta_{\sim m}) & \cdots & g(t_k, \theta_{\sim m}) \end{bmatrix}_{m \times k}, \quad (2.18)$$

na qual $\theta_{\sim l}$ é equivalente a $[\theta_{1l}, \dots, \theta_{ql}]^T$. O índice k pode ser o mesmo que n , o tamanho do tempo experimental para dados de falha, ou pode ser de um vetor escolhido dos tempos

entre falhas. A matriz das médias e a de covariância da variável pode ser obtida usando um procedimento similar expresso pela Eq. 2.14 e Eq. 2.15.

Os intervalos de abrangência para as previsões do modelo e o ajuste são estimados seguindo o procedimento do intervalo mínimo proposto pelo Suplemento GUM 1 (BIPM et al., 2008b). Em relação ao modelo, este intervalo indicará quão precisa é a sua previsão em cada tempo t_i . À medida que esse intervalo aumenta, menos útil é o modelo para representar o conjunto de dados. De maneira semelhante, no que diz respeito ao ajuste, isso indicará a exatidão do índice na avaliação da qualidade do modelo.

2.1.8 Abordagem Clássica x Abordagem bayseana por resíduos

Como apresentado anteriormente todo o processo matemático de definição da função confiabilidade passa por escolhas entre caminhos diferentes. No artigo 'A novel Bayesian approach for reliability modeling : The benefits of uncertainty evaluation in the model selection procedure' (SANTANA et al., 2018), há uma comparação entre abordagens distintas, a que foi descrita até este ponto e que será chamada de clássica com uma formulação que é chamada de convencional e a abordagem com uma nova formulação bayseana usando os resíduos entre um estimador de confiabilidade não paramétrico e as previsões do modelo de confiabilidade a ser ajustado. Dois estudos de caso são apresentados para caracterizar as diferenças entre as duas formulações Bayesianas (convencional e resíduos).

Para exemplificar, o processo de seleção do modelo pode ser compreendido usando o fluxo para descrito no artigo e apresentado na Figura 6.

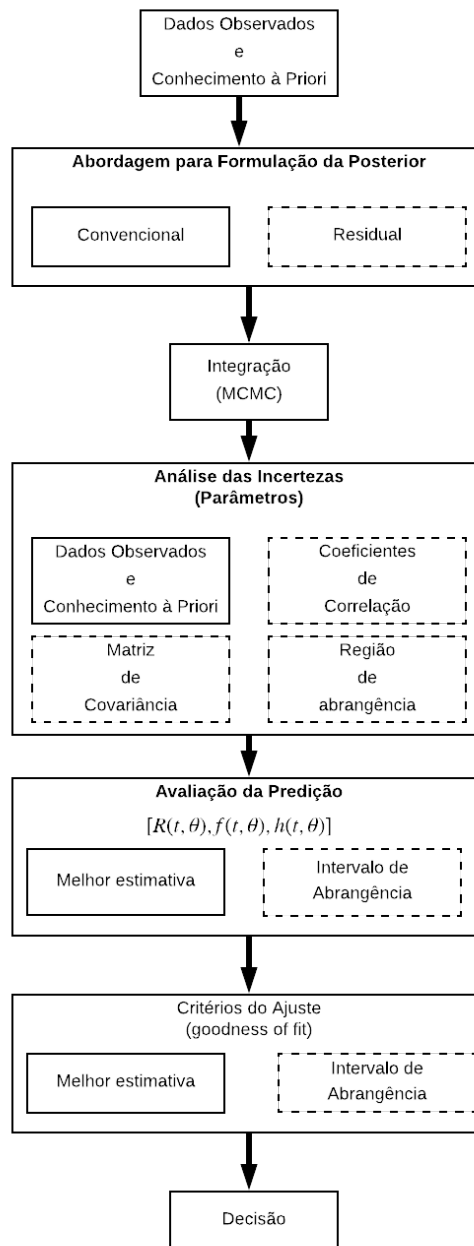


Figura 6 – Resumo do método para seleção do modelo. Linhas sólidas (—) representam os passos comumente usados na literatura, enquanto as linhas pontilhadas (—,6pt) representam os passos adicionais propostos no artigo de SANTANA et al., 2018.

Verifica-se na Figura 6 que Cadeias de Markov e simulações de Monte Carlo (MCMC) são usadas. O uso dos procedimentos MCMC tem sido aplicado ao campo da confiabilidade nos últimos 20 anos (GUO; MONAS; GILL, 2014; BECK; AU, 2002; GUPTA; MUKHERJEE; UPADHYAY, 2008; DHILLON, 2006; UPADHYAY; VASISHTA; SMITH, 2000).

Este processo até definir um modelo, e a função completa com a identificação dos

seus parâmetros, é cíclico e iterativo até a obtenção da melhor representação do fenômeno.

A seleção de modelos é geralmente focada na capacidade de predição do modelo, enquanto algumas características dos parâmetros não são usadas como uma indicação da qualidade do modelo, mesmo estando diretamente disponíveis no paradigma Bayesiano, a saber: sua matriz de covariância, coeficientes de correlação e cobertura regiões. Espera-se que, além de uma pequena incerteza, os parâmetros também apresentem uma pequena correlação, o que significa que cada parâmetro explica diferentes partes dos dados experimentais.

2.1.8.1 Uma proposta de sistematização do processo de seleção do modelo e estimativa dos parâmetros

O método proposto para a seleção de modelos matemáticos varia desde a estimação de parâmetros até a avaliação dos índices de ajuste numéricos, considerando suas incertezas associadas para a tomada de decisão sobre o que melhor descreve o conjunto de dados. Consiste nas seguintes etapas:

1. Coleta de dados e conhecimento à priori: os tempos entre estados de falha e conhecimento especializado sobre a falha a ser avaliada;
2. Formulação da posterior e integração: estimar os parâmetros do modelo usando diferentes formulações de verossimilhança. Uma é a verossimilhança aplicada na literatura e outra é a proposta baseada nos resíduos da estimação;
3. Avaliação das incertezas dos parâmetros, da predição e dos índices de *goodness of fit*, independente de já terem sido obtidas as melhores estimativas;
4. Comparar os índices e selecionar os modelos que melhor descrevem os dados de falha, exemplificando com dois estudos de caso.

As regiões de cobertura dos parâmetros podem fornecer informações sobre as correlações entre os parâmetros ajustadas, o que permite depurar a seleção de modelos. A análise permite também avaliar sistematicamente a qualidade dos modelos matemáticos para a função confiabilidade, uma vez que as incertezas associadas às previsões do modelo e os índices de *goodness of fit* indicaram diferentes capacidades dos modelos avaliados na descrição de um determinado comportamento de falha.

A avaliação da incerteza dos índices de desempenho associados à abordagem proposta foi um fator decisivo na escolha do melhor modelo, ao passo que tal tarefa para a abordagem convencional não foi conclusiva. Mesmo quando os modelos apresentaram uma capacidade de predição semelhante (critérios de R^2 e AIC), com sobreposição, as correlações dos

parâmetros (regiões de abrangência) foram um elemento chave no processo de tomada de decisão.

2.1.8.2 Estudo de caso do uso do intervalo de abrangência como critério de avaliação da estimativa dos parâmetros

No artigo de Santana et al (2018), são apresentados dois estudos de caso: (i) dados de ensaios em chapas metálicas na avaliação da vida quando submetidas a fadiga biaxial; (ii) dados de falhas de sensores eletrônicos de posição na linha de produção de uma indústria automotiva (SANTANA et al., 2018).

O segundo caso será parcialmente apresentado como exemplo do uso do intervalo de abrangência como um dos critérios de ajuste (*goodness of fit*) para suportar a decisão sobre a seleção do modelo matemático de predição da confiabilidade. Uma formulação por resíduos e uma nova abordagem bayesiana foi proposta, mas neste trabalho será apenas apresentado um dos aspectos das conclusões do artigo.

Os dados são de falhas de sensores eletrônicos de posição em uma linha de montagem de automóveis.

$t/\text{min} = [531, 567, 602, 646, 665, 665, 751, 794, 798, 799, 822, 832, 848, 857, 952, 1028, 1076, 1085, 1094, 1139, 1203, 1262, 1309, 1336, 1340, 1451, 1451, 1472, 1477, 1489, 1710, 1753, 1950, 1967, 1991, 2061, 2095, 2130, 2131, 2291, 2315, 2528, 2543, 2656, 2701, 2731, 2779, 2961]^T$.

Três modelos com o mesmo número de parâmetros foram utilizados neste estudo: (i) Weibull; (ii) lognormal; e (iii) normal.

A Tabela 6 mostra os resultados das estimativas dos parâmetros já nos seus intervalos de abrangência avaliados com a verossimilhança dos resíduos, e estão incluídos nos avaliados pela abordagem convencional. Embora os parâmetros estimados de ambas as abordagens sejam estatisticamente equivalentes, a incerteza dos parâmetros obtidos pela abordagem por resíduos é menor.

Tabela 6 – Case 2 - Intervalos de abrangência dos parâmetros, para as abordagens convencional e residual.

Modelo Weibull		
Parâmetro	Abordagem	Intervalo de Abrangência
β	Convencional	[1,8 2,8]
	Residual	[1,8 2,0]
η	Convencional	[1,5 · 10 ³ 1,9 · 10 ³]
	por Resíduos	[1,6 · 10 ³ 1,7 · 10 ³]
Modelo lognormal		
Parâmetro	Abordagem	Intervalo de Abrangência
μ	Convencional	[7,0 7,3]
	por Resíduos	[7,16 7,19]
σ	Convencional	[4,0 · 10 ⁻¹ 6,1 · 10 ⁻¹]
	por Resíduos	[5,4 · 10 ⁻¹ 6,0 · 10 ⁻¹]
Modelo Normal		
Parâmetro	Abordagem	Intervalo de Abrangência
μ	Convencional	[1,2 · 10 ³ 1,7 · 10 ³]
	por Resíduos	[1,37 · 10 ³ 1,44 · 10 ³]
σ	Convencional	[5,8 · 10 ² 8,7 · 10 ²]
	por Resíduos	[7,2 · 10 ² 8,5 · 10 ²]

Verifica-se na Tabela 6 que os resultados dos intervalos de abrangência para a abordagem por resíduos foram menores que o da convencional para todos os modelos matemáticos. Pode-se inferir que a abordagem por resíduos gera um resultado mais assertivo. Para melhorar a avaliação as Figuras 7, 8 e 9 retratam a previsão de confiabilidade, a partir da qual pode-se concluir que a abordagem por resíduos leva a predição de confiabilidade de todos os modelos mais próximos da estimativa não paramétrica, R^{np} . No entanto, o desvio dos resultados da abordagem convencional é pequeno.

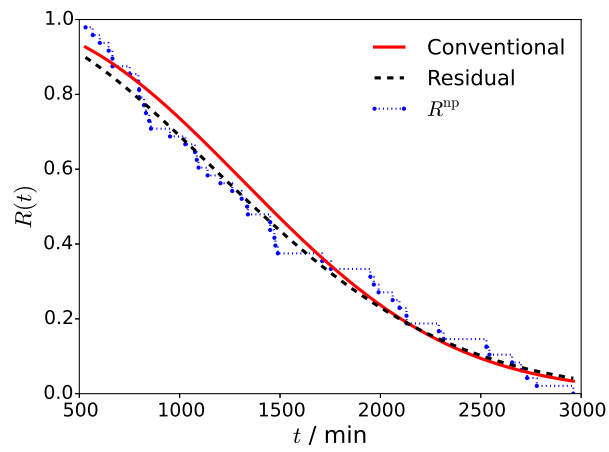


Figura 7 – Modelo Weibull

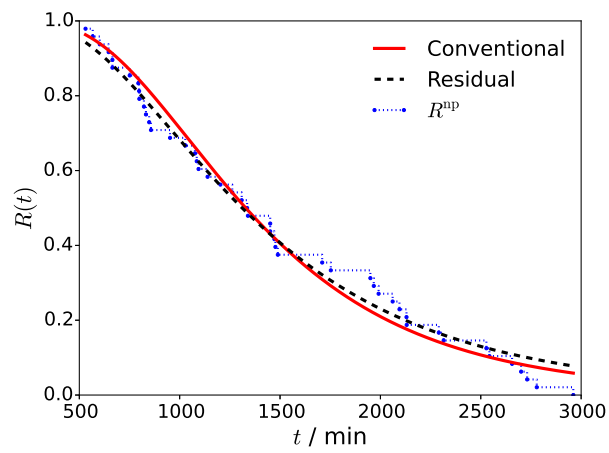


Figura 8 – Modelo Lognormal

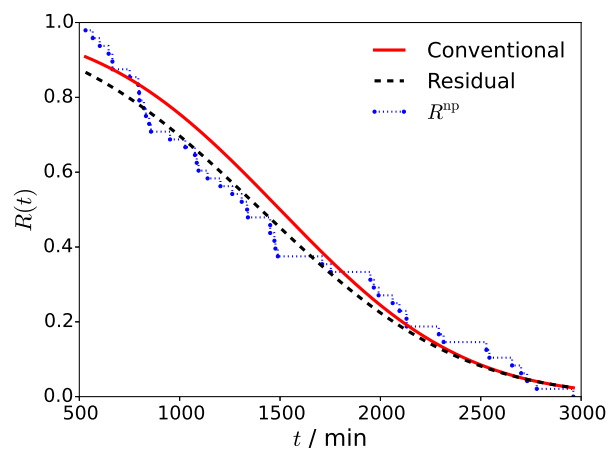


Figura 9 – modelo Normal

Em relação à comparação de modelos, o intervalo de abrangência de 95% da variância dos resíduos, ϕ , será usada como índice de comparação: (i) a lognormal fornece $[6,8 \cdot 10^{-4}, 1,6 \cdot 10^{-3}]$, (ii) a normal $[1,5 \cdot 10^{-3}, 3,5 \cdot 10^{-3}]$, and (iii) a Weibull $[8,9 \cdot 10^{-4}, 2,0 \cdot 10^{-3}]$. Todos esses modelos têm intervalos com algum grau de sobreposição, portanto, todos os resíduos têm uma dispersão semelhante em torno do valor médio.

Adicionalmente, a Tabela 7 indica que todos os intervalos de cobertura para os valores de R^2 avaliados na abordagem convencional se sobrepõem. No entanto, isso não ocorre na abordagem residual, na qual o modelo lognormal possui um maior valor de R^2 e não há sobreposição de seu intervalo de cobertura, e a estimativa é sistematicamente maior para a abordagem por resíduos para todos os modelos. Além disso, possui o menor valor para o critério AIC em ambas as abordagens, sem sobreposição na abordagem por resíduos.

Tabela 7 – Estudo de caso - Estimativa dos *Goodness of fit* e os intervalos de abrangência de 95% probabilidade.

Abordagem para Estimação	Modelo	R^2		AIC	
		Estimativa	Intervalo de abrangência	Estimativa	Intervalo de abrangência
Convencional	Weibull	0,94	[0,85, 0,98]	766	[764, 770]
	Lognormal	0,95	[0,89, 0,99]	764	[762, 767]
	Normal	0,92	[0,82, 0,97]	771	[769, 776]
por Resíduos	Weibull	0,983	[0,981, 0,984]	-175	[-178,-171]
	Lognormal	0,987	[0,985, 0,987]	-188	[-191,-183]
	Normal	0,970	[0,968, 0,972]	-149	[-152,-144]

Portanto, a lognormal apresentou a melhor capacidade de predição quando analisado pela abordagem por resíduos, porém no convencional não é possível distinguir este comportamento do modelo de Weibull. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam as diferenças de capacidades preditivas desses modelos e seus intervalos de abrangência de 95%.

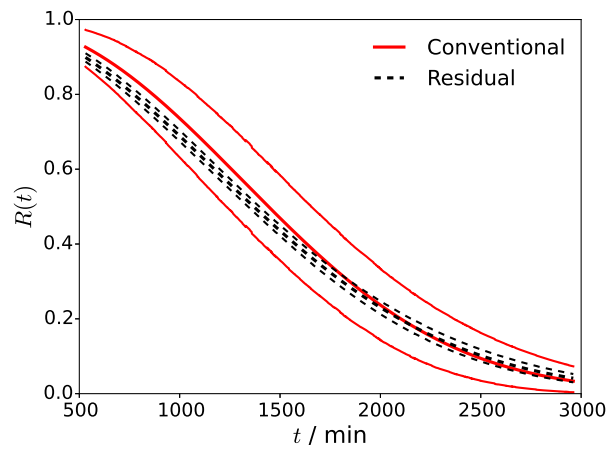


Figura 10 – Modelo Weibull

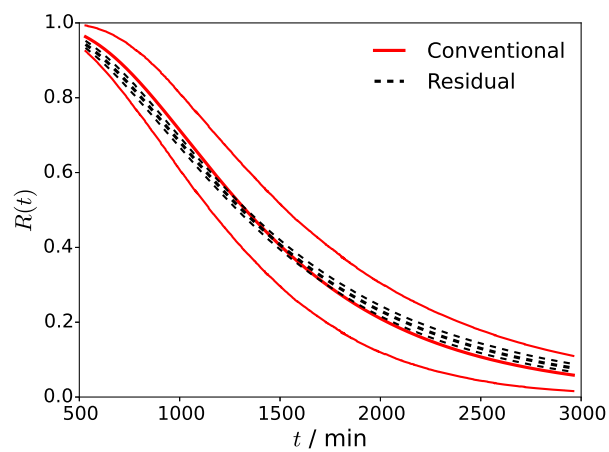


Figura 11 – Modelo Lognormal

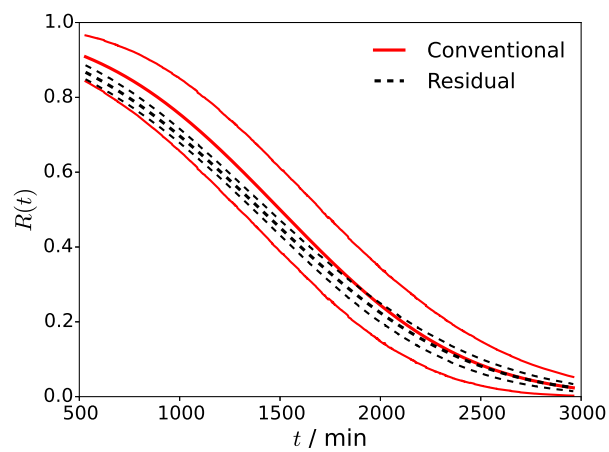


Figura 12 – Modelo Normal

Com a apresentação do estudo de caso verifica-se as diversas possibilidades de realizar as estimativas e a complexidade a que é submetido o analista de engenharia em tomar a decisão final.

2.2 REVISÃO SOBRE ENGENHARIA DE FATORES HUMANOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA

O assunto Falha Humana, Erro Humano ou Confiabilidade Humana tem sua relevância reconhecida em todos os segmentos industriais, seja pelo impacto dos acidentes, pela qualidade do produto, nos incidentes e na saúde do trabalhador ou nas pequenas perdas de produção que afetam o resultado da empresa.

O objeto de estudo, o Ser Humano no Ambiente Industrial, pertence a muitas ciências diferentes, portanto é uma área de estudo multidisciplinar. Esta multidisciplinaridade dá um tratamento sobre o tema com objetivos, cenários e focos alinhados com cada disciplina específicos. Em busca de uma síntese, o escopo de uma revisão bibliográfica para uma proposta com esse perfil precisa apresentar não só o estado atual, mas, também, incluir as referências já consideradas como clássicas em cada uma das correntes de pensamento, e que ainda servem de fundamento para os métodos atuais. A Figura 2.2 apresenta um mapa dos assuntos relacionados a confiabilidade humana.

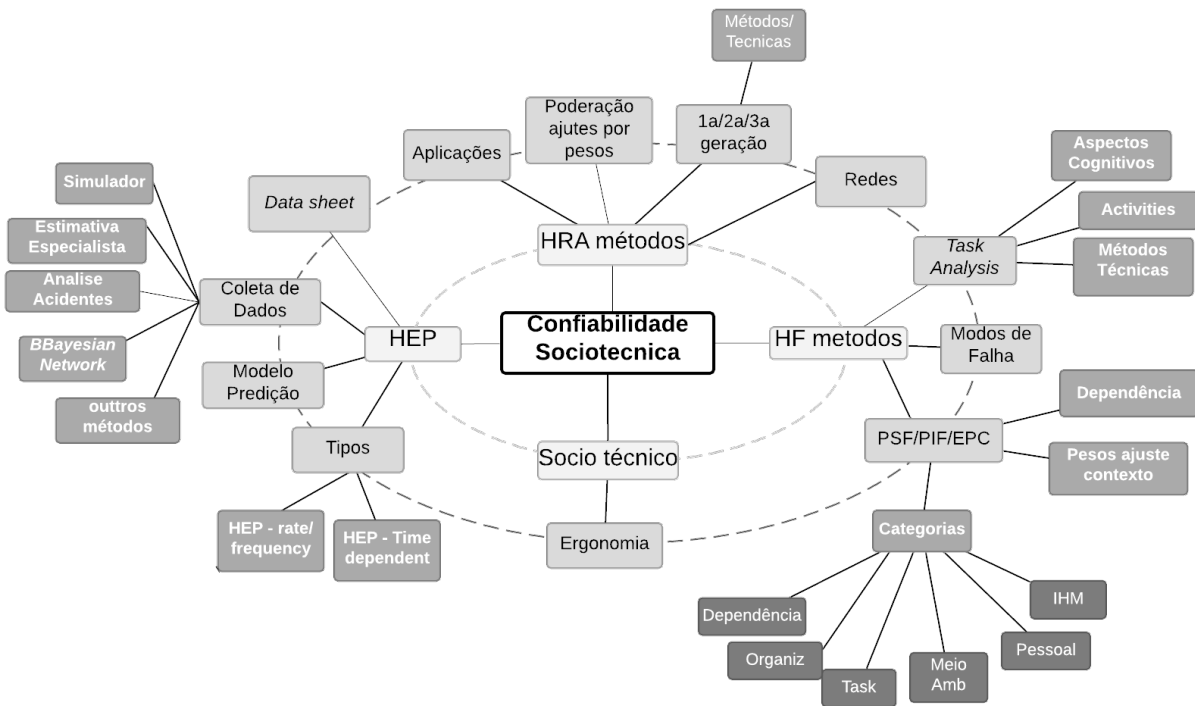


Figura 13 – Mapa da revisão sobre confiabilidade humana.

Como nota-se na Figura 2.2 quatro assuntos centrais serão considerados na revisão

apresentada: (i) métodos de avaliação da confiabilidade humana (*Human Reliability Assessment* (HRA)), (ii) métodos de Fatores Humanos (*Human Factors*), (iii) o conceito sobre sistema Sociotécnico, e (iv) a avaliação sobre probabilidade de erro humano (*Human Error Probability* (HEP)).

A expressão Confiabilidade Humana tem sua origem na busca dos engenheiros da indústria de energia nuclear por valores que representassem as possíveis falhas humanas em situações críticas (SWAIN; GUTTMANN, 1983a; FILHO, 1999; SPURGIN, 2009a; CCPS, 2004a; HOLLNAGEL, 1998a). A partir dos estudos verificou-se a necessidade de desenvolver métodos para tratar os dados, prever as falhas e a forma com que elas poderiam se desenvolver nas atividades.

Comparando com a teoria conhecida da confiabilidade de sistemas e a forma probabilística adotada para a predição das situações de falha, toda uma área de estudo foi desenvolvida para se obter taxas e, como consequência, probabilidades de falhas humanas. Contudo neste processo percebeu-se a necessidade de inclusão de muitas outras variáveis nos modelos matemáticos propostos. Mais do que qualquer máquina, o ser humano varia seu desempenho significativamente em função de fatores externos, assim como pelos fatores internos, complexos pela própria natureza humana. Espera-se que o homem no ambiente industrial de risco atue de maneira uniforme e com ações previsíveis a todas as situações, mas é de fácil entendimento que isto não é possível para nenhum ser humano em longo prazo.

Variáveis como personalidade, caráter, temperamento são avaliadas por mecanismos distintos aos usados na avaliação da confiabilidade de um equipamento. A tarefa é outro elemento que precisa ser avaliado, pois introduz demandas cognitivas diferentes ao executante da atividade. Um outro aspecto é que o valor encontrado era usado para entrar geralmente em modelo em série com o resultado da confiabilidade do equipamento, ou usado em uma árvore de falhas ou em uma árvore de eventos que não conseguem representar o contexto e muito pouco a realidade dos eventos.

2.2.1 Engenharia de Fatores Humanos

Dois ambientes em que o alto risco está envolvido tem destaque na estruturação dos estudos sobre a falha humana na engenharia: a indústria nuclear para geração de energia e o transporte aéreo. A aviação com enfoque em *Human Factors* (REASON, 1990; STANTON; SALMON, 2004; HENRIQSON et al., 2009; DEKKER, 2005; ICAO, 1993; ICAO, 1998). Esta abordagem é voltada para interação entre pilotos e o ambiente da cabine de controle (ICAO, 1998), buscando a melhoria da resposta dos pilotos às situações de emergência (ICAO, 1993), assim como prevenção de falhas em tarefas de rotina que levem a cenários catastróficos. Já a indústria nuclear com uma abordagem sobre riscos

em processos tinha como objetivo incluir as falhas humanas nas análises probabilísticas de risco – (*Probability Safety Assessment* (PRA)), e análises probabilísticas de segurança – (*Process Safety Assessment* (PSA)) (SPURGIN, 2009a; GOMES et al., 2013; CCPS, 2004a). Esta é uma abordagem matemática para representar a probabilidade do erro humano em situações de emergência.

Ambientes como petróleo e gás (extração, exploração, transporte, refino), petroquímica, geração e transmissão de energia hidrelétrica ou termoelétrica, apesar das características peculiares, seguiram as soluções dos setores citados anteriormente. A indústria aeroespacial acompanha as abordagens inicialmente propostas no transporte aéreo, porém as condições a que são submetidos os astronautas são bem mais exigentes.

Há nesse ponto a separação entre o enfoque dado da Engenharia de Fatores Humanos e a Engenharia de Confiabilidade. As subseções a seguir tratam sobre pontos comuns aos dois grupos. Defini-se Engenharia de Fatores Humanos como [A aplicação do conhecimento sobre as capacidades humanas e limitações para projetar a planta, seus sistemas e equipamentos. A HFE oferece razoável garantia de que o design da planta, sistemas, equipamentos, tarefas humanas e o ambiente de trabalho são compatíveis com os atributos sensoriais, perceptuais, cognitivos e físicos do pessoal que opera, mantém e dá suporte à planta ou outras instalações (in NUREG 0711 (O'HARA; FLEGER, 2004)). São elementos típicos de um programa de engenharia de fatores humanos (HFE): gerenciamento das ações de manutenção e melhoria dos requisitos de fatores humanos, avaliação e controle da experiência operacional, análise de tarefas, requisitos de análise funcional, controle de qualificações e treinamento, design da interface humano-sistema, desenvolvimento de procedimentos, aplicação das *Human Reliability Assessment* (HRA), verificação de *Human Factors* e monitoramento do desempenho humano.

Pode-se considerar que a Engenharia de Fatores Humanos (que inclui os *Human Factors Methods* (HFM)) é um conjunto de métodos multidisciplinares que fornecem conhecimento fundamental para entender o comportamento de sistemas técnicos sociais (FALZON; Fundación MAPFRE, 2009; CCPS, 2004b; CHANG; MOSLEH, 2007a; DHILLON, 2009; SO; LAM, 2014; ANTONOVSKY; POLLOCK; STRAKER, 2014; STANTON et al., 2005a). O ambiente industrial é um sistema técnico social complexo com humanos e equipamentos integrados em processos técnicos e organizacionais. Os HFM foram desenvolvidos para analisar sistemas complexos com a presença de seres humanos. Os métodos sobre Confiabilidade Humana (*Human Reliability Assessment* (HRA)) são desenvolvidos para avaliar a propensão, e, em algumas casos, estimar a probabilidade, de falha de um sistema que em sua origem tem o desempenho humano em uma tarefa (CHANG et al., 2014a; TRAN et al., 2007; DHILLON; LIU, 2006; BORING et al., 2010; CCPS, 2007a; DHILLON, 2009; HOLLNAGEL, 1998a; SPURGIN, 2009a; SILVA; MENEGON; CARVALHO, 2012; KIRWAN; GIBSON; HICKLING, 2008) e são baseados nos HFM.

2.2.1.1 Análise de Tarefas

A tarefa é o trabalho prescrito pela organização, e a atividade é o real que representa o que o executante mobiliza, o trabalho real. A tarefa pode significar um pedaço do trabalho a ser realizado ou feito e atividade significa o que realmente é feito. Uma tarefa é o que é planejado e define um objetivo em diferentes dimensões (qualidade, quantidade, etc.) e em condições de desempenho específicas (métodos, requisitos de segurança, restrições de tempo, materiais, máquinas, etc.)(WEERDT; BARATTA, 2015). A tarefa também pode ser considerada um conjunto de padrões de operações, que sozinhos ou em conjunto com outras tarefas, podem ser usados para atingir um objetivo (KIRWAN; AINSWORTH, 1992).

Cada tarefa industrial demanda habilidades físicas e mentais específicas que caracterizam a tarefa. Alguns métodos de HRA propõem a identificação destas demandas específicas, na forma de atividades/ ações padronizadas no seu processo de análise da tarefa, como *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM) (HOLLNAGEL, 1998a). Essas atividades fazem parte da tarefa total. O conhecimento sobre o processo cognitivo na mente humana dessas atividades específicas é bem estabelecido na bibliografia e pode explicar como os humanos erram (DHILLON, 2009; SPURGIN, 2009a; CCPS, 2004c).

A tarefa tem grande influência nas *Human Error Probability* (HEP) porque alguns fatores influenciadores (PSF) variam significativamente com as mudanças em uma tarefa. (BORING; BLACKMAN, 2007; CHANG et al., 2014a; GRIFFITH; MAHADEVAN, 2015a; GROTH; MOSLEH, 2012; KIM et al., 2015; MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2016). Alguns PSF mudam quando as características da tarefa mudam, como a mudança da execução individual para uma tarefa desenvolvida em equipe.

Para este trabalho definiremos a expressão Análise de Tarefas como a metodologia para descrever a sequência física ou mental de ações de um humano com objetivo de alcançar uma meta/estado de um sistema técnico, sendo o conjunto de verificações e a elaboração de um modelo representativo das ações a serem desempenhadas (KIRWAN; AINSWORTH, 1992). O uso das metodologias de análise de tarefas é básico em todas as aplicações citadas em confiabilidade humana (CCPS, 2004c; SPURGIN, 2009a; BERTOLINI, 2007; AMBROGGI; TRUCCO, 2011; MARTINS; MATURANA, 2013; FONSECA et al., 2013; SZWARCMAN et al., 2009; RENATO; FIRMINO; DROGUETT, 2008) e na maioria em fatores humanos (STANTON et al., 2005a; CCPS, 2007b).

A metodologia serve como ponto de partida para desenvolver as atividades de cada função, os sistemas técnicos, estabelecer análises quanto as cargas e performance para as funções, definir perfis profissionais e para as análises de risco. Então a composição de uma tarefa deve conter o sistema técnico, a identificação do sistema humano, o estado atual e o

estado que se quer alcançar, criando uma imagem detalhada deste sistema na perspectiva do humano participante (KIRWAN; AINSWORTH, 1992).

As tarefas podem ocorrer em três tipos diferentes: (i) Serial, (ii) Paralela e (iii) Monitoramento de demandas cognitivas elevadas (FIGUEIRÔA et al., 2013). Nenhuma tarefa é só apenas um desses tipos. A tarefa tipo serial é bem descrita em modelo cartesiano como a metodologia *Hierarchical Task Analysis* (HTA) (SPURGIN, 2009b; STRÄTER, 2004; KIRWAN; AINSWORTH, 1992)), mas os outros dois tipos são deduzíveis, mas não são completamente descritos em blocos de baixo nível das atividades. A HTA *Hierarchical Task Analysis* (HTA) ainda é um método muito utilizado de análise de tarefas. A Figura 2.2.1.1 apresenta um exemplo ilustrativo da aplicação método HTA.

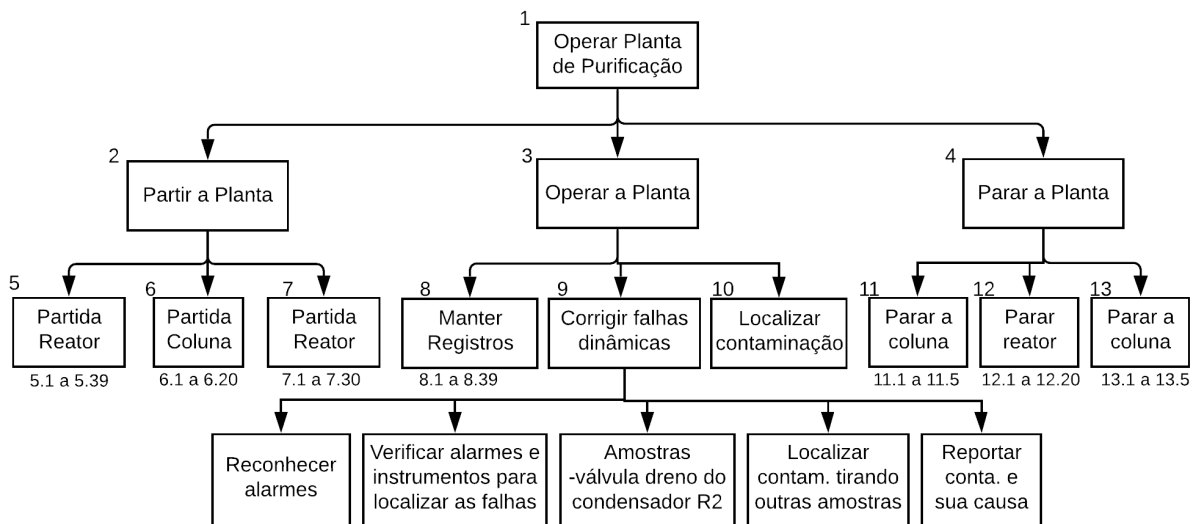


Figura 14 – Exemplo da Técnica *Hierarchical Task Analysis* (HTA) para uma partida de uma planta industrial de processo.

Na ergonomia a abordagem também se direciona pela tarefa, através do método chamado análise ergonômica do trabalho ou da atividade (FALZON; Fundación MAPFRE, 2009; CHARLTON, 2013; COUTAREL; DANIELLOU, 2008; HALL-ANDERSEN; BROBERG, 2014). É importante salientar que esta proposta é mais holística considerando a multiplicidade de fatores e possui foco e ferramentas metodológicas distintas, assim como o objetivo do estudo está direcionado à condição do ser humano e não ao impacto ao processo como tratado nas análises de risco. As tarefas têm características que dependem de como as exigências físicas e mentais aparecem ao longo da sua execução.

A análise de tarefas reforça o conceito de que os erros humanos são resultados do design da situação de trabalho, que inclui a tarefa, os equipamentos, o ambiente. Segundo Drury e Fox (apud LORENZO, 2001) a maioria dos erros humanos (80 a 85%) é consequência disto. Os gestores tem controle direto sobre o design da situação de trabalho,

provendo os recursos necessários, portanto têm o poder para eliminar as situações propensas ao erro.

Alguns métodos propuseram colocar o olhar da análise nas atividades a exemplo do *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM) (HOLLNAGEL, 1998a), mas não abordam como reconhecer essas atividades na implementação. O modelo de interpretação é criado para descrever o fenômeno, mas a taxonomia para as atividades propostas nem sempre podem ser distinguidas por observação (exemplo: atividade de interpretação). Uma das abordagens proposta nesse trabalho é desenvolver termos adequados para estas atividades de tarefas.

A Figura 15 apresenta um exemplo do desdobramento de uma tarefa.

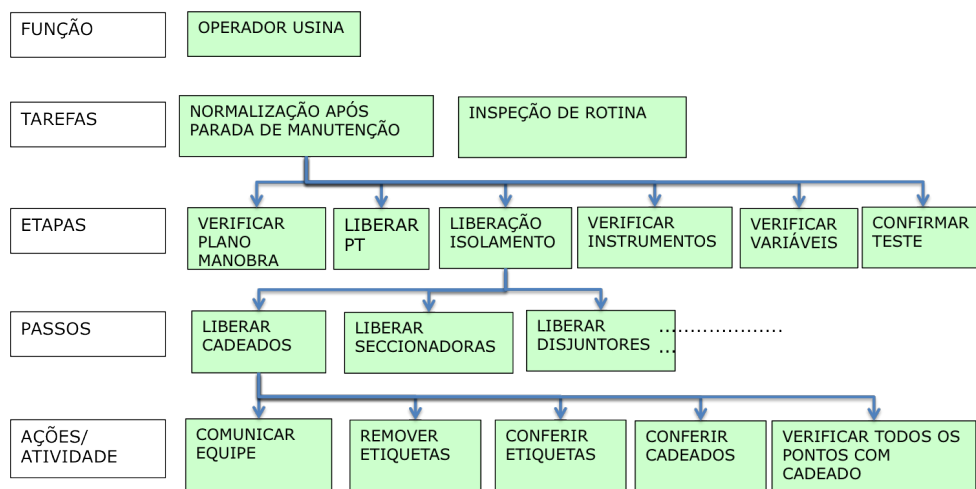


Figura 15 – Análise da tarefa para um operador de usina hidrelétrica

As Ações ou Atividades identificadas nos níveis mais baixos da Figura 15 foram tratadas no *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM) como atividades básicas características como pode ser visto no modelo da Figura 16.

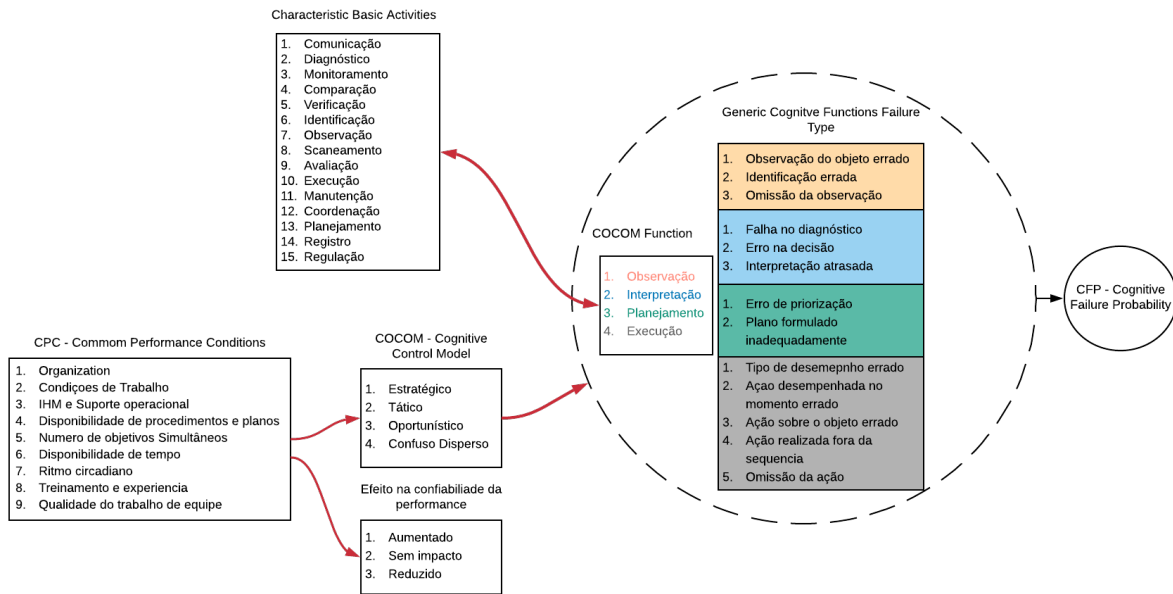


Figura 16 – Diagrama ilustrativo do processo do CREAM.

A lista das atividades é complementada com as funções cognitivas de controle (*COCOM Functions*) conforme verifica-se no diagrama da Figura 16.

2.2.2 Fatores de Influência no desempenho humano

Nos textos iniciais sobre estudos sobre o erro humano (SWAIN; GUTTMANN, 1983a; EMBREY, 1992) a busca por fatores causais aparece como forma de explicar os fenômenos, tanto internos como externos. Para serem usados de forma científica os fatores foram categorizados permitindo a análise da sua influência no desempenho humano por classes.

O estudo realizado por Swain and Guttman (SWAIN; GUTTMANN, 1983a) reconhece a variabilidade devido a fatores internos e externos ao ser humano, alguns já bem conhecidos, e introduz um ajuste ao contexto da probabilidade de erro humano nominal (*Human Error Probability* (HEP)), mudando o seu valor (DHILLON, 2009; HOLLNAGEL, 1998a; CHANG et al., 2014a; KUMAR; GANDHI; GANDHI, 2015; BERTOLINI, 2007; RONG; TIAN, 2014a; PRVAKOVA; DANG, 2013). Esta ponderação está relacionada aos fatores que eram reconhecidos como influentes no desempenho humano. Estes fatores foram chamados *Performance Shaping Factor* (PSF), e são variáveis contextuais (por exemplo: brilho, ruído, limitação do tempo) e variáveis individuais (por exemplo: temperamento, experiência, caráter). A escolha da expressão *Performance Shaping Factor* (PSF) estabeleceu referência para a maior parte de todos os métodos de avaliação da confiabilidade humana, que separam a avaliação de fatores causais e uma referência de probabilidade de falha humana (SPURGIN, 2009a; PRVAKOVA; DANG, 2013; KIRWAN, 1997). Em vários outros métodos estes pesos aparecem, geralmente com outros nomes, mas fundamentalmente

têm o mesmo objetivo nas estimativas de probabilidade. Outras siglas similares PIF – Performance Influencing Factors, EPC - Error Producing Conditions or Situational Factors, CPC - Control Performance Conditions, HEIF - Human Error Inducing Factors (CHANG et al., 2014a; SPURGIN, 2009a; AKYUZ; CELIK; CELIK, 2017a; HOLLNAGEL, 1998a; ALVARENGA; MELO; FONSECA, 2014; AKYUZ; CELIK; CEBI, 2016a; AKYUZ, 2016; KUMAR; GANDHI, 2011; BERTOLINI, 2007; CHANG; MOSLEH, 2007c; CCPS, 2004c).

Os PSF / PIF/ EPC/ CPC/ HEIF são derivados de estudos em fatores humanos. No Brasil a expressão Fatores Humanos é muito pouco usada e os profissionais de ergonomia absorveram esta área de estudo. Os estudos de engenharia para desenvolvimento de produtos sempre consideram os dados obtidos da ergonomia, particularmente os relacionados a antropometria (PAHL et al., 2005; IIDA; GUIMARÃES, 216). A ergonomia é conhecida pela preocupação com o sistema músculo-esquelético e nas empresas diretamente relacionada as ações de saúde ocupacional, em que inclui também o sistema cardio-pulmonar e saúde mental. Entretanto possui atualmente uma abordagem muito mais ampla (STANTON et al., 2005b; FALZON; Fundación MAPFRE, 2009; CCPS, 2007b).

Tentando entender o que pode afetar o desempenho humano, a engenharia de fatores humanos considera qualquer fator que possa afetar o desempenho humano (ANTONOVSKY; POLLOCK; STRAKER, 2014; PARK et al., 2015; GRIFFITH; MAHADEVAN, 2015b; RIBEIRO et al., 2016; PASQUALE et al., 2015; KIM et al., 2015; COYNE; MOSLEH, 2014; GROTH; MOSLEH, 2012; AKYUZ; CELIK; CELIK, 2017a; AKYUZ; CELIK; CEBI, 2016a).

O processo de ponderar usando os PSF /PIF /EPC /CPC /HEIF é usado nos métodos de avaliação da confiabilidade humana como THERP, SLIM, CREAM, ATHEANA, IDAC, HEART and SPAR-H (CCPS, 2007a; RIBEIRO et al., 2016; FONSECA et al., 2013; ALVARENGA; MELO; FONSECA, 2014; AKYUZ; CELIK; CEBI, 2016a; AKYUZ; CELIK; CELIK, 2017b; SPURGIN, 2009a; MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2015; LEE; KIM; JUNG, 2013; KIM et al., 2015).

As avaliações de especialistas em engenharia de fatores humanos das condições de trabalho transformam os PSF / PIF/ EPC/ CPC/ HEIF em valores numéricos (PARK; LEE, 2008; AKYUZ; CELIK; CEBI, 2016b; PREISCHL; HELLMICH, 2013; CHANG et al., 2014a; KIM et al., 2015; KUMAR; GANDHI; GANDHI, 2015; BERTOLINI, 2007; TRAN et al., 2007).

A maioria dos métodos de *Human Reliability Assessment* (HRA) usa esses fatores, mas é complexo lidar com as dependências entre os mesmos para determinar um número de probabilidade representativo mais condizente com a realidade (AMBROGGI; TRUCCO, 2011; GRIFFITH; MAHADEVAN, 2015a; KUMAR; GANDHI; GANDHI, 2015; SINGH; KUMAR; KUMAR, 2015; BERTOLINI, 2007). Um fator pode afetar o outro e vice versa. Um exemplo do ambiente físico de mais fácil compreensão é o do *layout* do posto de

trabalho, que é influenciado pela iluminação, e a iluminação usada no posto é determinada pelo *layout*.

Existem incertezas consideráveis nos resultados das *Human Reliability Assessment* (HRA) devido à falta de evidência empírica em relação à HEP nominal.

Na visão atual da ergonomia destacam-se os trabalhos da ergonomia francesa (FALZON; Fundación MAPFRE, 2009; COUTAREL; DANIELLOU, 2008). Nesta abordagem o olhar é focado sobre a atividade e a interação do ser humano com todo o contexto do trabalho, incluindo aspectos sócio-culturais. A sua visão da multiplicidade das interações do contexto auxilia no levantamento dos fatores, porém gera uma complexidade grande durante a sua prática, mesmo quando usando os métodos mais conhecidos (COUTAREL; DANIELLOU, 2008; CHARLTON, 2013; SILVA; MENEGON; CARVALHO, 2009; GHOSH et al., 2011).

2.2.2.1 Categorização dos Fatores de Influência

Nesta revisão bibliográfica foram usadas referências de normas, de pesquisas realizadas por instituições de diferentes segmentos econômicos e de artigos relacionados ao tema. O levantamento foi realizado em normas (SWAIN; GUTTMANN, 1983a; LORENZO, 2001), livros (HOLLNAGEL, 1998a; SWAIN; GUTTMANN, 1983b; SPURGIN, 2009a; FALZON; Fundación MAPFRE, 2009; STANTON et al., 2005b), surveys de instituições de diferentes setores econômico (CCPS, 2007b; BELL; HOLROYD, 2009) e de artigos (BERTOLINI, 2007; DAI; LI; ZHANG, 2010; LEE; CASSANO-PINCHE; VICENTE, 2005; CHEN et al., 2013; PARK; LEE, 2008; RONG; TIAN, 2014a; BORING; BLACKMAN, 2007; RASMUSSEN; STANDAL; LAUMANN, 2015; PASQUALE et al., 2015; DAI; LI; ZHANG, 2010) e foram identificados mais de 150 termos que representam fatores que influenciam o desempenho do ser humano. Interpretando os termos conceitualmente, foi verificado que nas referências, em vários casos, o mesmo termo representava coisas distintas gerando mais informações para serem trabalhadas nas análises. Uma lista de 210 itens de verificação foi estabelecida interpretando os termos e expressões.

Analisada a lista de fatores de influência buscou-se uma classificação coerente para o suporte às análises de contexto. A lista foi agrupada em 5 grandes categorias, apresentadas na Tabela 8 com exemplos para cada categoria.

Tabela 8 – Exemplo de categorias de fatores de influencia no desempenho humano

CATEGORIAS	FATORES
Aspectos Organizacionais	Pressão do tempo, recursos materiais, ferramental, suporte logístico, política de segurança da planta, horas de descanso, política de Simulação.
Ambiente Físico	Iluminação, ruído, vibração, layout, ventilação, temperatura.
Características da Tarefa	Velocidade, complexidade, exigência força, demanda de outras pessoas, vigilância sem eventos, comunicação.
Características Pessoais	Experiência, treinamento, sexo, histórico formativo, Nível cultural, habilidades, stress/ fadiga.
Interface Homem Máquina	Feedback, recuperabilidade, demanda cardio-respiratória, demanda músculo-esquelético , sinalização.

Estes fatores agem sobre o ser humano, porém nos métodos em geral a interpretação é sobre a tarefa, ou seja os fatores influentes no desempenho humano, internos ou externos, acabam mudando a tarefa no momento da sua execução. A Figura 17 representa esta forma de interpretar o impacto do *Performance Influencing Factor* (PIF) .

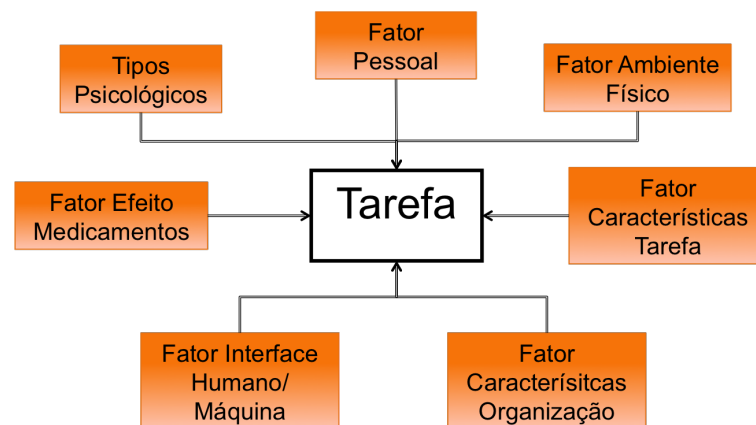


Figura 17 – Exemplo Fatores influentes ao desempenho humano sobre as Tarefas (Fonte: próprio autor)

Considerando a aceitação de uma lista de fatores de influência, próximo passo é a necessidade de definição de escala para estes fatores, para que os analistas possam julgá-los.

Há diversos fatores de influência (ambiente físico, características pessoais, aspectos fisiológicos) que variam ao longo de um dia e também ao longo dos meses. Um outro desafio é buscar meios para fazer previsão do comportamento dessas variáveis ao longo do tempo.

Outra forma é modelar as relações causais entre os fatores é contextualizar considerando pesos diferenciados aos fatores (ELEVA et al., 2012; SPURGIN, 2009b). Uma outra é aplicar descritores da lógica Fuzzy (LIGINLAL; OW, 2006; SZWARCMAN et al., 2009; DAI; LI; ZHANG, 2010; BERTOLINI, 2007; LIN et al., 2014; ZAREI et al., 2016; BAZIUK; RIVERA; LEOD, 2016). Abordagens com objetivo de absorver a complexidade das relações entre fatores também são usadas como mapas mentais e teoria de grafos (BERTOLINI, 2007), redes bayesianas (DAI; LI; ZHANG, 2010; CALIXTO; LIMA; FIRMINO, 2013; CAI et al., 2013; MARTINS; MATURANA, 2013) ou redes de aprendizagem Neuro-fuzzy (STRÄTER, 2004). Outros modelos matemáticos têm sido propostos na forma de diagrama de blocos de confiabilidade montados em série (DHILLON, 2009; PALLEROSI CARLOS A., 2011). No caso dos blocos em série são construções mais coerentes em tarefas bem padronizadas e repetitivas (exemplo: indústria de manufatura), porém não seriam uma solução para ambientes complexos (exemplo: óleo e gás, petroquímico, aviação, usinas de energia nuclear).

2.2.2.2 Modelos por redes dos FID

Os diagramas de influência (*Influence Diagram*) (CHANG; MOSLEH, 2007a; CHANG; MOSLEH, 2007c; EMBREY, 1992) foram desenvolvidos como modelos para os processos de tomada de decisão envolvendo um conjunto de agentes influentes. Uma das primeiras referências na década de 90 é de uma aplicação para avaliar probabilidade de erros humanos em situações de emergência em usinas nucleares (PHILLIPS L.D., 1990).

A aplicação deste método é na representação das causas básicas de falhas, em especial para falhas com vários fatores e interações complexas. Uma abordagem usando *Influence Diagrams* (ID) englobaria tanto elementos humanos como físicos do sistema técnico.

Em muitos casos os fatores são multi-atributos (compostos de um conjunto de sub-fatores) e não podem, portanto, ser medidos ou definidos em uma única dimensão (EMBREY, 1992). Os desdobramento excessivo em muitos níveis de detalhamento é uma decisão da experiência do analista, evitando que a avaliação de um fator deseje acurada desnecessariamente (casos de fatores subjetivos, como motivação), ou impraticável (não mensurável por meios conhecidos). A Figura 18 apresenta um exemplo de um *Influence Diagrams* (ID).

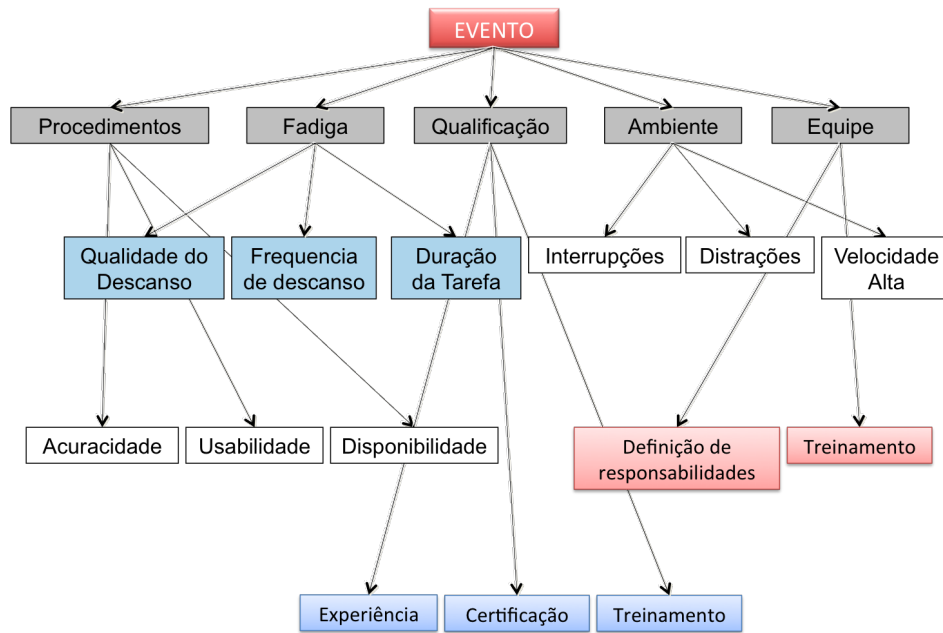


Figura 18 – Exemplo diagrama de influência para um evento em que ocorreu uma falha humana

Ainda sobre as soluções por redes, vale destacar uma em específico que ganhou vários artigos nos últimos 10 anos, a *Belief Baysean Networks* (BBN) (MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2015; MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2016; ZWIRGLMAIER; STRAUB; GROTH, 2017; GROTH; SWILER, 2013; MOHAMMADFAM et al., 2017; SUN et al., 2012a; RONG; TIAN, 2014b; CHANG et al., 2013). Esta solução é um desdobramento da rede bayeseana. A saída da rede bayeseana é uma probabilidade, porém para obter este resultado segue uma lógica da Teoria dos Grafos (MONTANI; PORTINALE; BOBBIO, 2005). Pela Teoria dos Grafos o modelo é direcionado e acíclico, os arcos e setas implicam dependência causal direta, assim como os diagramas de influência, entre um nó (um fator de influência no desempenho humano por exemplo) e outro. Neste modelo caso um fator tenha algum tipo de dependência com outro (ambos tem influência sobre o resultado do outro), conceito de Grafo acíclico não poderá ser aplicado. Se os fatores não são independentes entre si, nesta modelagem não há como obter um valor que seja uma probabilidade. Para estes cenários existe a opção da *Belief Baysean Networks* (BBN), que cria uma *'believefunction'*.

As redes bayeseanas são ainda usadas quando é possível estabelecer inequivocamente as relações de dependência. Redes probabilísticas levariam a afirmações incoerentes se não podem ser especificadas a probabilidades observadas nas combinações causais entre fatores. Strater (2004) afirma que redes probabilísticas não oferecem a possibilidade de prover uma medida interpretável uniforme e ambígua tanto para contexto geral como específico, nem na forma de frequências, nem como *beliefvalues* (STRÄTER, 2004). Redes probabilísticas podem oferecer afirmações relativas sobre as relações entre dois cenários (exemplo: cenário

1 é mais frequente que o cenário 2). A Figura 19 apresenta uma combinação de métodos em que a BBN entra para analisar uma atividade humana.

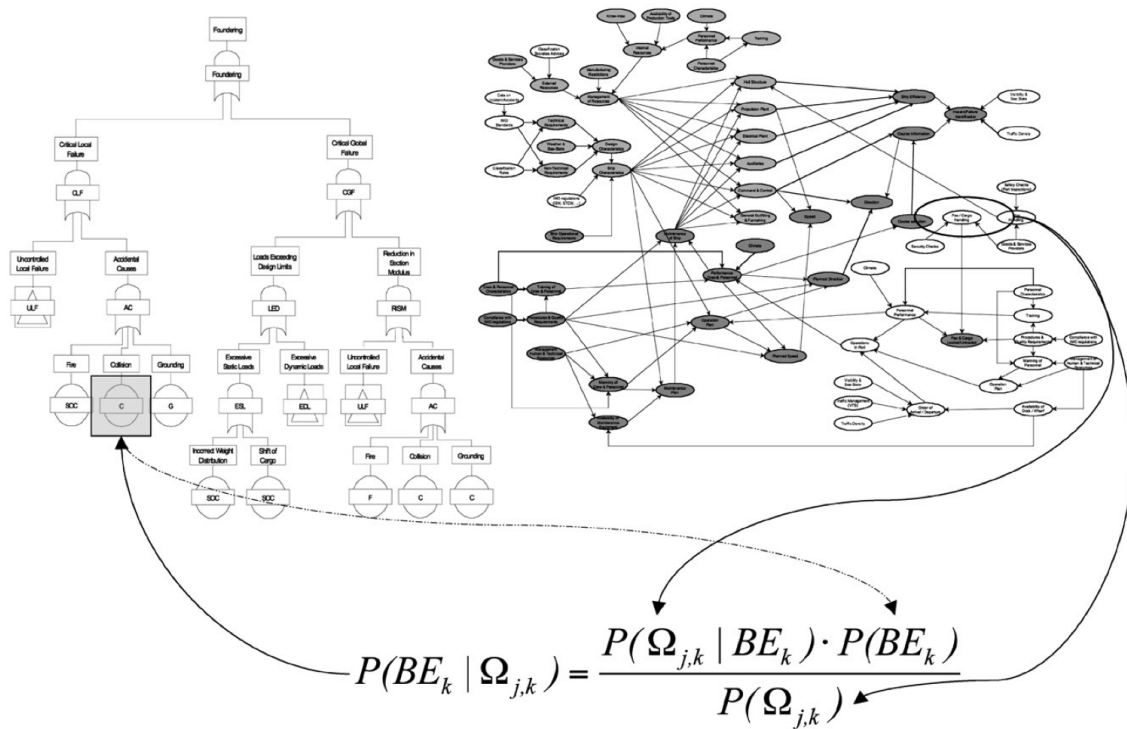


Figura 19 – Técnicas combinadas de árvores de falhas com *Belief Bayesian Networks* (BBN) associada a uma evento humano e seus fatores de influência (in TRUCCO et al., 2008).

Nesse trabalho a tabela de probabilidade condicional foi aplicada entre fatores e influência (referência na Figura 20 para um conjunto de ações observáveis de um conjunto de tarefas). Entretanto, a montagem da tabela de probabilidade condicional é uma solução muito dependente da experiência do analista, e experiência apesar de útil, pode ser enviesada por ser aprendida apenas em casos muito específicos.

A abordagem por redes foi descartada devido a algumas constatações não só na literatura consultada como nas entrevistas com analistas usuários desta solução. Dentre as mais relevantes, (i) a necessidade de dados completos para estabelecer todas as relações entre fatores, e serem especificados em probabilidades, (ii) a explosão combinatória entre fatores passou de 10 bilhões de possibilidades.

2.2.2.3 Modelo por frequência de ações observáveis

Um outro modelo para interpretação foi elaborado para descrever os fenômenos que ocorrem, na forma de unidades de tarefas que são sempre possíveis de serem verificadas. Uma padronização dessas atividades observáveis típicas na execução de tarefas de manutenção e operação foi realizada representando momentos específicos físico-mentais. Este quadro

foi discutido entre uma equipe envolvendo também ergonomistas, psicólogo e psiquiatras. Podemos citar como ações observáveis na indústria a lista da Tabela 9 (FIGUEIRÔA et al., 2013):

Tabela 9 – Lista de ações observáveis de tarefas industriais

Ações	
Comunicação	Reparo
Contagem	Ajuste
Teste	Amostragem
Inspeção	Manobras
Monitoramento	Manuseio e Transporte
Diagnóstico	Serviços*
Instalação	Serviços Administrativos
Remoção	Planejamento
Medição	Montagem

*limpeza, lubrificação, seleção, separação, substituição

É preciso entender que a atividade ou ação é o menor nível observável da demanda físico-mental de uma tarefa, porém podem ocorrer vários processos cognitivos não mensuráveis e de variáveis não conhecidas em cada pessoa. Qualquer descrição de atividades envolvendo níveis mais detalhados será apenas interpretativa e de validação difícil.

Na Figura 15 sobre o desdobramento de uma tarefa do operador de uma usina, o nível mais baixo são as atividades ou ações observáveis. O conhecimento sobre como ocorrem os erros humanos neste nível é bastante conhecido pela psicologia cognitiva (CHANG; MOSLEH, 2007b; HOLLNAGEL, 1998b). Os erros humanos ocorrem na tarefa mais especificamente em alguma atividade observável.

A Figura 20 apresenta a mudança de referencial saindo impacto dos *Performance Influencing Factor* (PIF) do nível de tarefa para o nível de atividade observável.

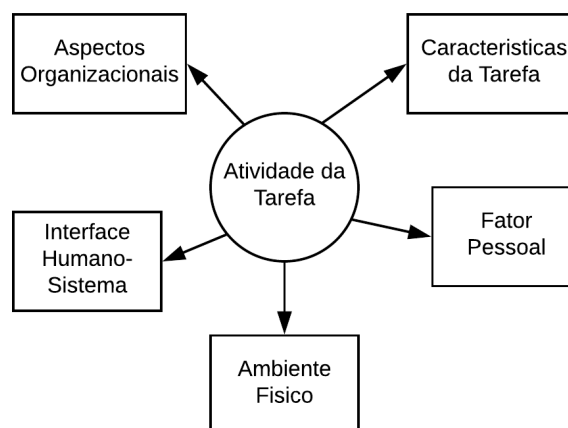


Figura 20 – Influência dos PIF sobre a Ação Observável.

Como as tarefas são combinações das unidades básicas aqui chamadas de 'atividades observáveis', foi proposto o uso da frequência com que ocorrem as unidades na tarefa como peso na ponderação da avaliação da falha humana. Quanto maior a frequência de uma atividade em uma tarefa, maior a importância da atividade na definição do risco em ocorrer falha humana. Numa tarefa como pedalar uma bicicleta em uma área rural a atividade de monitoramento não é tão importante quanto a atividade de manobras, portanto, uma queda não tem maior propensão de ocorrer devido a um monitoramento deficiente do que quanto a incapacidade de manobrar. Porém se a tarefa de pedalar for desempenhada em uma avenida em um grande centro urbano e no horário de tráfego intenso de veículos, a atividade de monitoramento será tão importante quanto a de manobras.

portanto a ponderação por frequência da atividade na tarefa estabelece uma escala para a propensão a falha. Para uma atividade específica o impacto de um fator de influência no desempenho humano será sempre o mesmo, não importa a tarefa. Neste caso, a mudança de foco da análise de tarefas simplifica o processo de avaliação.

A maior parte das demandas busca por uma tendência ao maior ou menor risco, um valor qualitativo obtido de uma escala. A escala proposta baseada na frequência da atividade atende satisfatoriamente e ainda vem de um processo quantitativo. Dado que a o risco para falhar esta diretamente proporcional a presença da atividade específica, e considerando que o conhecimento sobre estas unidades de momentos físico e mentais são bem conhecidas na literatura sobre erro humano, será possível estabelecer ações de melhorias, preventivas ou de mitigação diretamente sobre as atividades e não sobre toda a tarefa. Portanto, no exemplo da tarefa de pedalar em uma avenida com tráfego intenso só poderá reduzir o risco de falhar se for possível ampliar a capacidade do ser humano de monitoramento, por exemplo com um dispositivo tecnológico de alerta de proximidade com alertas.

Uma tarefa poderia ser desenvolvida contabilizando a frequência de ocorrência de cada atividade na tarefa, como será mostrado no Capítulo 4, na seção 4.3.1, no contexto de uma aplicação específica. O peso da atividade observável que estaria associado a sua frequência na tarefa, e os fatores de influência que a moldam, determinariam a propensão para sucesso ou falha.

A abordagem por frequência de ações observáveis é uma solução possível para uma *Human Reliability Assessment* (HRA), que será apresentada no Capítulo 4.

2.2.3 Psicologia Cognitiva

Quando falamos de confiabilidade de um ser humano precisamos entender dos mecanismos intrínsecos ao ser humano. Uma área que ganhou corpo e respeito com a engenharia foi a Psicologia Cognitiva, devido a sua abordagem menos filosófica e de modelos

de análise mais próximos da engenharia. A Psicologia Cognitiva tem como temas centrais a Percepção, Atenção, Memória e Aprendizagem. A aplicação destes conceitos é fundamental no desenvolvimento de telas de computador para monitoramento, de instruções de trabalho e de produtos e no processo de tomada de decisão. (COYNE; MOSLEH, 2014; CHANG; MOSLEH, 2007a; ZAREI et al., 2016; NAN; SANSAVINI, 2016; HOLLNAGEL, 1998b; CACCIABUE, 2000; PAIVA; SANTOS, 2009). Alguns autores chamam este ramo da Psicologia de Engenharia Cognitiva tentando demonstrar, assim, a sua proximidade com a Engenharia (HOBBS; WILLIAMSON; DONGEN, 2010; HOBBS; REASON, 2003).

Existem muitas áreas que tratam desses mecanismos internos, como a neurologia, e certamente têm suas contribuições importantes para o assunto. Porém a psicologia cognitiva é a que tem relevância para este trabalho, em virtude da sua ampla absorção entre os engenheiros que lidam com o assunto na aplicação dos conceitos dentro das empresas. Alguns métodos de avaliação da confiabilidade humana são fortemente fundamentados nesta abordagem como o HCR – Human Cognitive Reliability (YANG et al., 2013), CREAM – Cognitive Reliability Error Analysis Method, IDAC – Information, Decision, and Action in Crew Context (CHANG; MOSLEH, 2007c), MERMOS – Méthode d’Evaluation de la Realisation des Missions Operateus pour la Surete (BOT et al., 1998), e PERERE (BEGOSSO, 2005).

2.2.4 Confiabilidade Sócio-Técnica

Sistema Sociotécnico (*Sociotechnical Systems* (STS)) no desenvolvimento organizacional é uma abordagem do projeto de trabalho organizacional complexo que reconhece a interação entre as pessoas e a tecnologia nos locais de trabalho. O termo também se refere à interação entre as complexas infra-estruturas da sociedade e ao comportamento humano. Nesse sentido, a própria sociedade, e a maioria de suas subestruturas, são sistemas sociotécnicos complexos. Aspectos como a diferença de culturas são fatores típicos considerados quando falamos em sistemas sociotécnicos (STRAUCH, 2010).

O termo sistemas sociotécnicos foi cunhado por Eric Trist, Ken Bamforth e Fred Emery (1951), do Instituto Tavistock, em Londres, baseado em suas investigações sobre trabalhadores nas minas de carvão inglesas (TRIST; BAUMFORTH, 1951). Em continuidade aos experimentos e na tentativa de melhorar a compreensão sobre o assunto, Rice (1958) manteve o termo e o aplicou também para classificar outras situações (in MAULE HG, 1958; RICE, 1970). Posteriormente os princípios centrais da teoria sociotécnica foram revisitados por seu autor principal atualizando as premissas e definições (TRIST, 1981).

O estudo de caso de 1951 é interessante porque, como a maior parte do trabalho na teoria sociotécnica, se concentra em uma forma de 'sistema de produção' da era e dos sistemas tecnológicos contemporâneos. O estudo focou sua análise na observação

paradoxal de que a produtividade estava caindo enquanto a tecnologia era melhorada, e que o absentismo estava aumentando apesar de melhores salários e serviços ofertados para os trabalhadores. A hipótese para a causa do problema foi de ter sido adotada uma nova forma de tecnologia de produção que criou a necessidade de uma forma burocrática de organização, como o comando e controle clássico (um gestor controla as informações e comanda o que deve ser feito).

No estudo a tecnologia trouxe um passo retrógrado em termos de design organizacional. A análise que se seguiu introduziu os termos 'sócio' e 'técnico' e elaborou muitos dos princípios fundamentais da teoria sociotécnica.

No campo da Ergonomia a abordagem sociotécnica é ampla para incluir os diversos conceitos envolvidos em uma análise de um posto de trabalho (CARAYON et al., 2015; OOSTHUIZEN; PRETORIUS, 2013; ROBERTSON et al., 2015). A abordagem ganha espaço com o avanço da computação e a compreensão de sistemas cognitivos que precisam de modelos de interpretação para serem usados (READ et al., 2015; HETTINGER et al., 2015), como por exemplo no desenvolvimento de interfaces (HILLIARD; JAMIESON, 2017). Compreendendo a interação destes sistemas, métodos para a avaliação quantitativa passam a ser desenvolvidos (RONG; TIAN, 2015).

2.2.5 Confiabilidade humana

A confiabilidade humana foi definida inicialmente de forma similar a confiabilidade de sistemas (SPURGIN, 2009a; KIRWAN, 1997; DHILLON, 2009), como um valor de uma probabilidade, como um desvio ou falha a um padrão estabelecido. É uma área da Engenharia de Fatores Humanos dentro do setor de geração de energia nuclear (O'HARA; FLEGER, 2004).

Os modelos de avaliação quantitativa das falhas humanas e sua confiabilidade associada ainda são demandados nas empresas, e apesar da reconhecida e altamente criticada (REASON, 1990; FILGUEIRAS, 1998; PASQUALE et al., 2015) ainda são publicados textos sobre estes modelos (RONG; TIAN, 2014a; SHIRLEY et al., 2015; SU et al., 2014; PARK et al., 2015; DHILLON, 2009; AKYUZ; CELIK; CEBI, 2016a; ALVARENGA; MELO, 2019; BLACKMAN, 2019). A continuidade de publicações e trabalhos de engenharia de confiabilidade para as empresas significa que existe demanda para o assunto e a necessidade de desenvolvimento de conhecimento e de métodos de aplicação.

As seções a seguir revisam alguns pontos mais críticos relacionados a avaliação da confiabilidade humana.

2.2.5.1 Estimativa do valor da *Human Error Probability Density Function* (HEPDF)

A primeira abordagem metodológica para desenvolver uma avaliação da confiabilidade humana foi descrita na norma NUREG/CR-1278 (SWAIN; GUTTMANN, 1983a) no contexto das centrais nucleares. A demanda era incluir ações de seres humanos na *Probability Safety Assessment* (PRA). Naquela época, os autores desta norma fizeram um levantamento sobre estudos quantitativos para erros humanos. Em 1978, o *Brookvan National Laboratory* estabeleceu as iniciais *Human Error Rates* para tarefas genéricas e Lukas et al (1982) publicou os resultados (in SWAIN; GUTTMANN, 1983a, p.64). Usando essa primeira referência, uma pesquisa maior foi desenvolvida e compilada no NUREG / CR-1278. As tabelas de HEP deste NUREG tornaram-se as mais utilizadas até hoje em dia.

A origem dessas tabelas foram simulações de situações reais. Em alguns casos estes dados eram obtidos após simulações estatísticas com base no conhecimento de especialistas na tarefa (*Expert Estimation*), que avaliavam quanto à possibilidade de falhar (GERTMAN; BLACKMAN, 1994; CCPS, 2004c; BORING; BLACKMAN, 2007; MARTINS; MATURANA, 2013). Uma outra fonte são os dados gerados por eventos, como acidentes e perdas de processo (STRATER, 2004).

Na abordagem por estimação de especialistas muitos ajustes foram propostos para melhor representar as probabilidades obtidas. O objetivo era reduzir a variabilidade dos seres humanos que estão julgando os cenários (ZHANG; THAI, 2016; SHETH; ANANTHARAM; HENSON, 2016; STRÄTER, 2004; EMBREY, 2002). As principais abordagens utilizam modelos estatísticos para censura (TRAN et al., 2007), curvas de utilidade para avaliar a predisposição ou tendência ao risco dos especialistas julgadores (MENÊZES; DROGUETT, 2007), ou descritores fuzzy representando as faixas dos resultados dos julgadores (BERTOLINI, 2007; DAI; LI; ZHANG, 2010; AKYUZ; CELIK, 2016).

Existem dois tipos de erros humanos contábeis, um é dependente do tempo e o outro não. Para o primeiro, as condições do simulador são a origem da maioria dos valores (KIRWAN; GIBSON; HICKLING, 2008; PARK et al., 2014; SHIRLEY et al., 2015; SWAIN; GUTTMANN, 1983a). Da mesma forma que a confiabilidade do equipamento, uma função de probabilidade de densidade contínua pode ser elaborada usando o tempo para concluir com sucesso uma tarefa específica como a variável independente. Nas tabelas HEP de tempo dependentes, a maioria dos casos são tarefas específicas em centrais de controle de usinas nucleares que demandam uma resposta do operador e o tempo é um parâmetro importante. No trabalho de descrito na NUREG/ CR-1278 (SWAIN; GUTTMANN, 1983a) Escolheu o modelo lognormal para a representar a distribuição de probabilidades da HEP para explicar melhor esse tipo de tarefa. Como a experiência de tarefa do operador tem grande influência no desempenho, os autores consideraram que o modelo lognormal poderia expressar melhor as diferenças de experiências e operadores novatos.

Alguns estudos foram realizados discutindo os extremos das distribuições de probabilidade e buscando quais destas representariam melhor os cenários de tarefas específicas (GERTMAN; BLACKMAN, 1994; DOUGHERTY; FRAGOLA, 1988). Não obstante as melhorias feitas, a exatidão e a sensibilidade dos valores das probabilidades de erros, as (*Human Error Probability* (HEP)) são as maiores fontes de críticas aos métodos quantitativos de confiabilidade humana (HOLLNAGEL, 1998a; REASON, 1990).

A HEP não dependente do tempo (tarefas de montagem, por exemplo) pode ser calculada pela equação 2.19 (TRAN et al., 2007; SPURGIN, 2009a; SHIRLEY et al., 2015; PREISCHL; HELLMICH, 2013; KIRWAN; GIBSON; HICKLING, 2008; CCPS, 2004c; BORING et al., 2010).

$$HEP = \frac{N_i}{N + 1} \quad (2.19)$$

na qual N_i é o total de falhas humanas acumuladas até o i -ésimo intervalo e N é o total de respostas (saídas) ou de oportunidades.

Como o registro de erro humano não faz parte da maior parte da cultura da indústria, outros processos para buscar essas informações foram usados como estimativa de especialistas (ALVARENGA; MELO; FONSECA, 2014; CCPS, 2004c; CHANG et al., 2014a; DUFFEY; HA, 2010; KIRWAN; GIBSON; HICKLING, 2008; MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2016; PODOFILLINI; DANG, 2013; SHIRLEY et al., 2015; SPURGIN, 2009a) e análise de acidentes (CHANG; MOSLEH, 2007a; FONSECA et al., 2013; PREISCHL; HELLMICH, 2013; RIBEIRO et al., 2016). Métodos mais sofisticados ainda estão sendo desenvolvidos (CHANG et al., 2014a; PODOFILLINI; DANG, 2013).

Kim et al. (2018) ressaltam que existem incertezas consideráveis nos resultados das avaliações de confiabilidade humana (*Human Reliability Assessment* (HRA)) devido à falta de evidência empírica em relação aos valores nominais de probabilidade de erro (KIM et al., 2018).

2.2.5.2 Identificação da falha humana para medição

Os aspectos culturais de reconhecimento da falha, e a admissão do cometimento de um erro, contraria a natureza da maioria dos humanos e carrega aspectos emocionais significativos. O conceito de culpa, por exemplo, gera a imposição de penalizações sociais, o que torna difícil o gerenciamento da coleta de informações sobre falhas humanas. As exceções quanto a este aspecto cultural são os casos de acidentes graves ou as perdas de produção significativas, pois como são detalhadamente investigados em geral são encontradas provas que demonstram que os eventos fugiram do controle dos agentes da falha.

Em qualquer situação na operação ou na manutenção a cultura industrial brasileira de responsabilização do indivíduo dificulta a identificação de uma falha humana e sua relação causal com os eventos. Como a solução em geral é focada no aumento da disciplina do executante, as organizações acabam não realizando uma análise de causa mais aprofundada por não se justificar, já que causa e solução vem da disciplina. O foco na disciplina operacional não permite verificar demandas por mudanças nos processos operacionais, na tecnologia do processo e no sistema físico, pois é apenas uma mudança comportamental.

Em muitos casos a tarefa é compartilhada por funções (operação e manutenção) e equipes diferentes. Mesmo quando separada em passos menores, responsabilizando-se individualmente por cada uma, no mundo industrial a expressão do pensamento mecanista das organizações de que 'cada um é um dente da engrenagem' é simplista para representar o real. Desta forma, a avaliação das HEP deveria levar em conta cenários de equipes, ou seja, um valor de HEP para o conjunto. O efeito do foco em pessoas e funções isoladas pode ser percebido nas constantes discussões entre operação, manutenção, e também com a engenharia, sobre quem são os culpados quando ocorrem perdas nas empresas.

Como realizar esta coleta por meios que fossem o mais objetivos possíveis, torna-se uma questão fundamental a ser tratada. Sem uma definição para identificar como um fato não há como ter um valor para cálculos de probabilidade de falha dos sistema.

2.2.5.3 Amostras de Falhas Humanas

A origem das tabelas de *Human Error Probability* (HEP) do método *Technique for Human Error Probability* (THERP) (SWAIN; GUTTMANN, 1983a) foram simulações de situações reais, modelagem estatística do conhecimento de especialistas na tarefa (*Expert Estimation*), e dados gerados por eventos, como acidentes e perdas de processo (ver seção 2.2.5.1). Neste último caso, é necessário aguardar a ocorrência dos eventos, as saídas dependem muito da história específica da engenharia de cada setor industrial e da resiliência das equipes operacionais.

Em 2014 um conjunto de instituições relacionadas ao setor de geração de energia nuclear, de países distintos, lançaram um modelo para levantamento de dados de erros humanos (CHANG et al., 2014a). O projeto, chamado *Scenario Authoring, Characterization, and Debriefing Application* (SACADA), usaria não só histórico de eventos em condições operacionais reais, como também os eventos ocorridos durante os treinamentos das equipes em simulações. Neste caso o processo de coleta é semelhante ao da THERP, porém aproveitando os constantes treinamentos das equipes operacionais na indústria de geração nuclear. Os primeiros resultados do banco de dados *Scenario Authoring, Characterization, and Debriefing Application* (SACADA) já são usados em trabalhos mais atuais (KIM et al., 2018).

Os dados de simulações de situações reais feitas em laboratório possuem mais exatidão

já que são condições controladas. Nesses casos, o estado psicológico dos executantes são controlados, assim como as características da tarefa e as condições ambientais. Os dados obtidos desta forma são cuidadosamente explorados, e o estudo torna-se mais flexível para detalhar o efeito do contexto. Uma simulação bem desenhada facilita a observação de determinados PSF, enquanto em uma abordagem a partir de uma anormalidade muitas variáveis dos PSF não são controladas, e nem correlacionadas.

Apesar das simulações em laboratório serem mais próximas do real, o conceito de um experimento reproduzível em que se fundamenta a ciência positivista, dominante no contexto da engenharia, não deve ser considerado essencial quando misturado às ciências sociais. Reproduzir o cenário para obter um dado quando envolve o ser humano em um sistema complexo, como o industrial, nem sempre é possível.

Em empresas com controle de qualidade em etapas de produção (caso da indústria de manufatura em geral) ou em que existem sistemas de monitoramento contínuo (exemplos: processos químicos, óleo e gás), estatísticas do desempenho da operação podem ser feitas. Valores de 'fora de especificação' para os parâmetros operacionais podem ser estabelecidos e estes desvios podem ser identificadas como apenas da responsabilidade do ser humano. Ou seja, um desempenho esperado do executante da tarefa através das variáveis de processo já controladas, incluindo um tempo de resposta esperado.

Na atividade de manutenção este levantamento de dados pode ser feito via o indicador Retrabalho, calculado pela divisão do número ordens de manutenção refeitas pela quantidade de ordens de manutenção realizadas no período. Para tanto, devem ser estabelecidos padrões de referência para especificar a manutenção refeita da realizada, com critérios objetivos (exemplo: será considerado Retrabalho, ordens de manutenção refeitas no mesmo componente em um prazo máximo de 7 dias entre um serviço e outro).

Para se realizar um estudo por simulação em laboratório, o investimento e a complexidade de se aproximar da realidade estão entre as maiores restrições. Desta forma, o caminho para avançar na sistematização do levantamento de dados de falhas humanas precisa ser viabilizado pelas informações de campo.

Um caminho na atual condição tecnológica encontrada no ambiente industrial é buscar informações disponíveis nos sistemas automatizados de controle e de monitoramento de parâmetros. Associar a saída de especificação de parâmetros já controlados a uma participação exclusivamente humana, permitirá um acompanhamento contínuo, e preditivo, de falhas humanas. O acompanhamento da evolução das HEP ao longo do tempo representa uma tendência a falhar, mas monitorando a tendência de crescimento da HEP a falha ainda seria evitável.

2.2.5.4 Métodos para avaliação da confiabilidade humana *Human Reliability Assessment* (HRA)

No levantamento feito pelo laboratório da instituição *Healthy and Safety Executive* (HSE) – Healthy and Safety Executive (BELL; HOLROYD, 2009), em um total de 72 ferramentas potenciais de avaliação da Confiabilidade Humana, 35 foram identificadas como potencialmente relevantes, quanto as informações disponíveis para uma aplicação real. Esta diversidade dificulta a seleção de um método e a disseminação destes entre engenheiros.

Apesar de várias gerações de metodologias com novos e mais sofisticados métodos como o SLIM-Maud (SPURGIN, 2009a; BORING et al., 2010), SPAR-H (SPURGIN, 2009a; BORING; BLACKMAN, 2007; GERTMAN; BLACKMAN, 1994), ATHEANA (FONSECA et al., 2013), MERMOS (BOT; RUIZ, 2013; MEYER; BOT; PESME, 2007; MOSLEH; CHANG, 2004; PRVAKOVA; DANG, 2013), CREAM (HOLLNAGEL, 1998a; SUN et al., 2012b), STAMP (RONG; TIAN, 2014a) ou CAHR (STRÄTER, 2004) a metodologia THERP, da 1ª geração ainda é aplicada. Os métodos foram atualizados principalmente pelo reconhecimento de que os aspectos cognitivos, de processamento das informações na mente humana, não eram tratados adequadamente. Mesmo após atualização os métodos mantiveram a mesma estrutura de abordagem. Neste trabalho serão tratadas as duas abordagens básicas dos métodos: orientada para a tarefa (exemplo: THERP (SWAIN; GUTTMANN, 1983a)) e orientada ao impacto do contexto em que ocorrem as atividades (exemplo: SLIM – Success Likelihood Index Method (CCPS, 2004c; PARK; LEE, 2008)).

O método SLIM propõe uma outra forma para considerar os fatores de influência (chamado de *Performance Influencing Factor* (PIF)) relacionando uns aos outros. Neste trabalho o valor da probabilidade de erro humano tem uma importância menor, pois os fatores determinam muito mais o resultado final. O método também tem como princípio o reconhecimento de que uns fatores são mais importantes que outros em cada contexto. Uma aproximação para determinar o peso final da combinação de fatores de influência é usar a experiência dos executantes (*Expert Estimation*) na determinação das redes de interações entre os fatores. Uma simplificação desta rede, chamada de Diagrama de Influência (EMBREY, 2002; MOSLEH; CHANG, 2004; CHANG et al., 2014b) aparece aplicada em alguns métodos.

Um aspecto relevante é a identificação e ajuste dos *Performance Shaping Factor* (PSF), os determinantes do contexto. Apesar dos esforços, existem poucos resultados que poderiam ser considerados como evidência sólida para as relações entre PSFs e as HEPs usarem valores numéricos (KIM et al., 2018). Os eventos das análises de acidentes e perdas incluem uma grande quantidade de dados contextuais, especialmente em situações anormais ou emergências, porém são raros. Os relatórios de eventos anormais geram dados de condições reais e portanto tem alta fidelidade (KIM; PARK; JUNG, 2017). Mesmo assim,

há subjetividade na avaliação dos PSF como consequência da percepção dos analistas sobre o evento. Até o momento não é solução obter ou definir uma HEP se nos modelos de previsão são demandados também a a estimativa dos fatores de influência.

2.2.5.5 Restrições para seleção do Modelo matemático da *Human Error Probability Density Function* (HEPDF)

O objetivo em obter o modelo matemático é poder predizer, com valores, os cenários possíveis, ou seja, uma aproximação do futuro para avaliar a necessidade de contra-medidas. Na seção 2.1.3, a Tabela 1 apresentou os modelos matemáticos e as aplicações relacionadas a este trabalho. No contexto da falha humana o modelo matemático precisa ser caracterizado pelo seu contexto, que, como já foi dito, varia significativamente por fatores externos e internos ao indivíduo.

O trabalho referencial de Swain and Guttman (SWAIN; GUTTMANN, 1983a) usou como melhor estimativa o modelo matemático da lognormal para ajustar uma distribuição de probabilidade aos dados de erro humano. Tal distribuição pareceu ser a mais adequada para as tarefas escolhidas. Este primeiro resultado influenciou os engenheiros de confiabilidade no direcionamento da sua análises para as falhas humanas quando encontravam este modelo de distribuição nas suas análises de falhas em sistemas. Observando tarefas industriais é concebível selecionar distribuições como a gaussiana para situações conhecidas, bem treinadas e com baixa complexidade, como a troca de elementos simples como placas eletrônicas, filtros ou peças e desgaste mecânico com encaixe direto. Em tarefas realizadas com equipes e nas quais a experiência na tarefa varia entre os executores podem ser testadas com uma distribuição lognormal. Tarefas pouco padronizadas, com equipes pouco treinadas ou que exigem etapas de análise de causas não conhecidas podem ser interpretadas por uma distribuição exponencial.

Mais uma vez a variabilidade do ser humano a fatores fora do seu controle dificultam a definição de uma distribuição. Apesar das melhorias na qualidade da escolha das distribuições a sensibilidade de uma função matemática em representar esta variabilidade ao contexto será válida apenas para tarefas específicas e com padronização já significativa do grupo de trabalho.

2.2.5.6 Validação e verificação do modelo

Dada a sensibilidade do desempenho humano aos fatores de contexto, qualquer modelo, conceitual ou matemático, deve ser verificado quanto a se comportar como previsto, e validado quanto a representar a realidade.

Nas aplicações de redes bayesianas de acreditação (*Belief Baysean Networks* (BBN)) em avaliações da confiabilidade humana Mkrtchyan et al (2015) categorizam os caminhos para validação dos modelos (MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2015). Por definição

a Validação seria o processo de confirmação do quanto a modelagem reflete a realidade. Já a Verificação é o processo para confirmar se a modelagem se comporta como esperado, para realizar uma análise de sensibilidade entre modelos ou fatores. Para a Verificação faz-se necessário simular em cenários conhecidos e, variando os fatores de entrada, realizar uma análise de sensibilidade. Já para Validação são necessários os dados de falhas humanas, as HEP.

Mkrtchyan et al (2015) dividem a Validação nas seguintes categorias:

- validação absoluta - quando baseada em dados reais;
- validação aproximada - quando baseada em dados de simulador, experimentos da literatura ou julgamento de especialistas;
- validação convergente - quando está baseada na comparação com outras técnicas.

Os autores também ressaltam as situações em que os modelos pretendem representar eventos raros, nos quais a validação terá sempre dados muito escassos.

Este trabalho foi desenvolvido para validação absoluta, e para tanto, um estudo de caso em um ambiente industrial foi procurado para ser aplicada a abordagem de levantamento de dados e sua sistematização. Para ser útil a um propósito científico, com um projeto de experimento adequado e representativo, os dados de falhas humanas precisariam ser isolados de outras causas de falhas do sistema, para tanto uma etapa de estruturação da metodologia foi como medir a falha humana separadamente.

2.3 REVISÃO SOBRE MODELAGEM POR EQUAÇÕES ESTRUTURAIS - MEE

Os cenários e os fenômenos a serem estudados neste trabalho encontram muitas vezes dados não aderentes há uma distribuição normal, mesmo que uma distribuição normal multivariada. Devido as muitas variáveis a serem determinadas e as muitas variáveis possíveis a serem mensuradas, os modelos ganham complexidade. São modelos em que ocorrem relações causais entre as variáveis, mensuradas e as variáveis a serem avaliadas. Em vários estudos são poucos os dados amostrais e, em alguns casos, com suporte teórico menos consagrado ou não explorado.

São justificativas para aplicação da modelagem por equações estruturais, e em particular com a formulação baseada na regressão das variâncias, (i) a ausência de distribuições simétricas das variáveis mensuradas, (ii) uma teoria ainda em fase inicial ou com pouca conhecimento estabelecido, (iii) quantidade pequena de dados (amostras pequenas), (iv) com modelos formativos ou com relação de causalidade com a grandeza a ser avaliada (HAIR JOSEPH F, 2016; RINGLE; SILVA; BIDO, 2014).

As modelagens por equações estruturais podem ser baseadas (i) na covariância, (ii) baseada na variância, (iii) em modelos de estimação do ajuste da máxima verossimilhança (MLE), ou (iv) em modelos de estimação do ajuste por mínimos quadrados parciais (*Partial Least Squares* (PLS)) (RINGLE; SILVA; BIDO, 2014).

No caso das modelagens por equações estruturais usando a covariância são feitas regressões lineares múltiplas realizadas paralelamente. No caso das modelagens baseadas na variância calculam-se inicialmente as correlações entre os construtos, variáveis não passíveis de observação, e as suas variáveis mensuradas, e após são realizadas regressões entre os construtos, a partir de um modelo estrutural proposto (HAIR et al., 2009; TABRI; ELLIOTT, 2012). O ganho no uso das modelagens por variância é que consegue realizar a estimativa de modelos mais complexos com um número menor de dados, o que é a situação encontrada neste trabalho como será vista nos capítulos a frente.

Um dos objetivos das MEEs é estimar efeitos diretos e indiretos de variáveis independentes sobre variáveis dependentes (ASPAROUHOV; MUTHÉN, 2009; HAIR et al., 2012; RINGLE et al., 2018). O conhecimento dos efeitos entre as variáveis amplia a capacidade de avaliação quanto a 'liberdade' das variáveis na determinação das variáveis dependentes com que estão relacionadas.

A modelagem de equações estruturais inclui uma família de modelos e surgiu como uma ferramenta completa tanto para pesquisa acadêmica quanto administrativa, resultante da evolução da modelagem multi equação desenvolvida para ciências econômicas e sociais. Em comum entre essa família de técnicas há duas características, primeiro a estimação de múltiplas e inter-relacionadas dependências segundo a habilidade para representar conceitos não observados nessas relações e explicar o erro de mensuração no processo de estimação (HAIR et al., 2009).

O erro de mensuração pode ser mostrado a partir de uma expressão do coeficiente de regressão conforme Eq.2.20,

$$\beta_{xy} = \beta_x \times \rho_x \quad (2.20)$$

onde β_{xy} é o coeficiente de regressão observado, β_x é o verdadeiro coeficiente estrutural e ρ_x é a confiabilidade da variável preditora. A palavra 'confiabilidade' usada aqui é um conceito que serve como indicador de quão bem a escala conseguiu mensurar o construto, não está logada aos assuntos confiabilidade de sistemas e confiabilidade humana. A confiabilidade do construto pode ser obtida como complementar do erro de mensuração.

A modelagem de equações estruturais é proposta para solucionar problemas em diversas áreas, as mais conhecidas no campo das ciências sociais e em marketing. Nas áreas técnicas é usada como percepção de uma população sobre (i) o risco de desastres (SMITH; ELDRIDGE; DEJOY, 2016), (ii) a implantação de filosofias de gestão industriais

(AL-DHAAFRI; AL-SWIDI, 2016; ANIL; K.P, 2019; HABIDIN et al., 2018; MCKONE; SCHROEDER; CUA, 2001; MODGIL; SHARMA, 2016; PHOGAT; GUPTA, 2018; PHOGAT; GUPTA, 2019; RANDHAWA; AHUJA, 2017; SONY; NAIK, 2012), (iii) o ambiente quanto à segurança de processo e ao trabalhador (AL-REFAIE, 2013; ARYEE; HSIUNG, 2016; INODKUMAR; BHASI, 2009; MCCAUGHEY et al., 2015; NYKÄNEN et al., 2019), (iv) o risco operacional em diversos setores (CHEN; CHEN, 2014; CHRAIF et al., 2016; MONTORO et al., 2019), (v) a segurança hospitalar (HOSSAIN et al., 2015), (vi) um novo sistema tecnológico (HENSELER; HUBONA; RAY, 2016; PENG; FAN; HSU, 2004), (vii) a qualidade em processos (MANZANI; SIDMOU; CEGARRA, 2019; BHATIA; AWASTHI, 2018), (viii) o risco de uma tecnologia (VAINIO; PALONIEMI; VARHO, 2017) ((PAN; XIN; LI, 2015), (ix) o gerenciamento e o impacto operacional (MELLAT-PARAST, 2013; KAFETZOPOULOS; PSOMAS; GOTZAMANI, 2015). Algumas outras referências que motivaram a aplicação da MEE neste projeto e que não foram incluídas nas aplicações já citadas tratam da preocupação com a predição do comportamento (GUO; YIU; GONZÁLEZ, 2016; TRUMBO, 1999; PAN; XIN; LI, 2015).

Na revisão não foi encontrada referência sobre aplicações relacionadas à confiabilidade de sistemas. Um único exemplo tratou da capacidade da engenharia de confiabilidade para o desenvolvimento da indústria aeronáutica (PAN; XIN; LI, 2015). Quanto a engenharia de fatores humanos, algumas das referências que tratam sobre risco operacional incluem aspectos da interface humano-máquina e análise da tarefa, porém, em nenhuma delas, o foco do estudo é a engenharia de fatores humanos.

2.3.1 Análise multivariada

Em muitas situações encontramos problemas com muitas variáveis se relacionando. Poderia ser a avaliação dos fatores de influência no desempenho humano, os fatores que afetam o desempenho do projeto de engenharia, ou a lista de elementos que compõe a percepção de risco de um ambiente de trabalho.

Existem muitas técnicas multivariadas que tem como um dos seus objetivos expandir a capacidade explanatória do pesquisador. Regressão múltipla, análise fatorial, análise multivariada de variância, análise de discriminante são exemplos de como abordar as situações multi variadas (ASPAROUHOV; MUTHÉN, 2009). A maioria das técnicas tem uma limitação que é tratar somente uma relação entre variáveis por vez, e em muitos momentos a pesquisa se depara com questões inter-relacionadas. A técnica de modelagem de equações estruturais combina duas técnicas, regressão múltipla e análise combinatória fatorial, permitindo uma abordagem simultânea das diversas relações. A Modelagem de Equações Estruturais (MEE) fornece uma boa transição da análise exploratória para a análise confirmatória, reduzindo esforços com relação a desenvolver uma visão mais sistemática e holística dos problemas a serem resolvidos.

2.3.2 Análise combinatória fatorial

A Modelagem de Equações Estruturais (MEE) combina a análise por regressão com a análise combinatória fatorial (HAIR et al., 2009). Considerando diversas variáveis que podem explicar o fenômeno que está em estudo, os fatores, existem muitas formas de se combinarem. Portanto a busca é por combinações dos fatores que melhor represente o fenômeno, permitindo uma análise de como ocorre e a realização previsões quando os fatores variam os seus valores.

A análise fatorial pode ser Exploratória ou Confirmatória. O processo exploratório parte dos dados para a construção do modelo conceitual, e na Análise Fatorial Confirmatória (AFC) apresenta-se um conjunto de hipóteses em um modelo diagramático conceitual e os resultados das suas relações confirmam se o modelo proposto foi validado ou não com base na amostra obtida.

Na Análise Fatorial Confirmatória (AFC) a variação de cada fator é decomposta em duas partes, a primeira comum a todos os fatores e uma segunda parte que é única para o modelo proposto. A primeira diz respeito a variação que é compartilhada com outras variáveis e a segunda é específica de uma variável única.

A Modelagem de Equações Estruturais (MEE) faz uso da AFC a partir de procedimentos de máxima verossimilhança. Maximizar a função de verossimilhança determina os parâmetros que tem maior probabilidade de produzir os dados observados, porém exige o atendimento a pressupostos para aplicá-la. Uma saída é aplicar a regressão por mínimos quadrados parciais (*Partial Least Squares* (PLS)) e flexibilizar os pressupostos (BARCLAY D., 1995; HAIR JOSEPH F, 2016; LOWRY; GASKIN, 2014).

2.3.3 Modelo Conceitual

O modelo conceitual é um diagrama que representa as hipóteses assumidas entre os construtos e apresenta o conjunto de variáveis a serem observadas relacionadas a cada um dos construtos (GRACE et al., 2012). Figura 50 apresenta um exemplo ilustrativo de um modelo estrutural inicialmente proposto para avaliação da qualidade de uma amostra para as avaliações quantitativas da confiabilidade de sistemas. A Figura 50 foi extraída do software SmartPLS (RINGLE CHRISTIAN M.; BECKER, 2015 (apud HAIR JOSEPH F, 2016)).

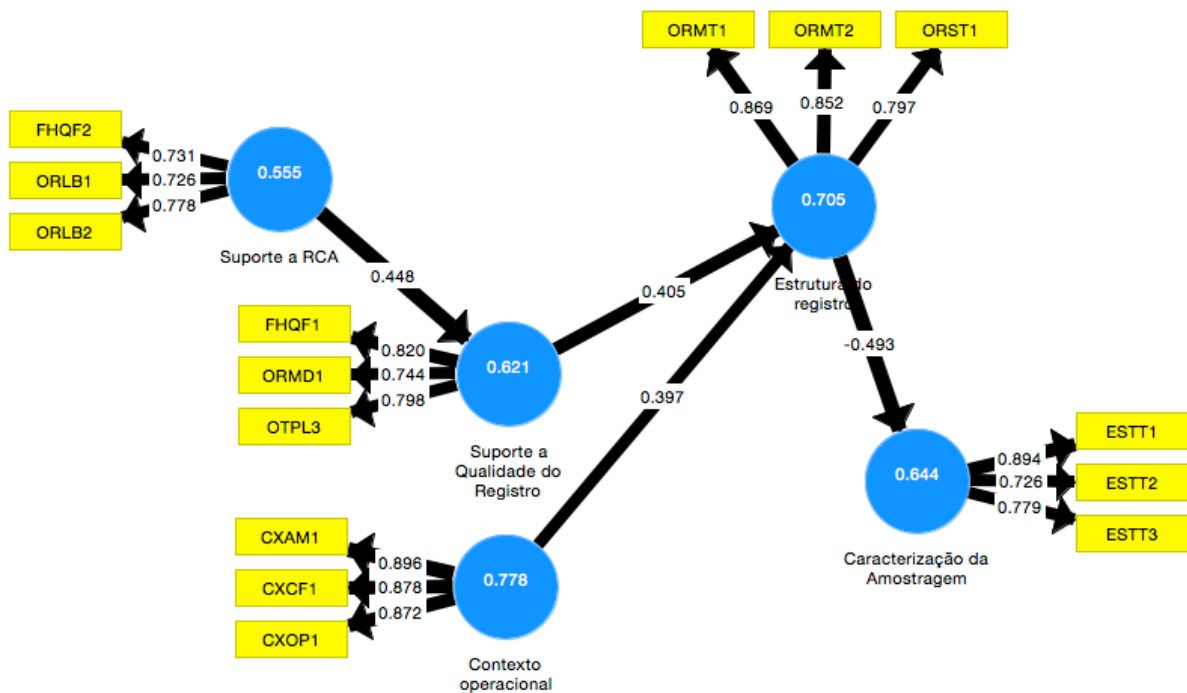


Figura 21 – Modelo estrutural 11 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.

O modelo 11 representa uma aproximação para explicar um fenômeno, no processo por análise confirmatória.

Os círculos em azul são conceitos que podem vir a explicar o fenômeno analisado, neste caso a qualidade da amostra obtida de dados para a confiabilidade, e são as variáveis latentes (V_l) do modelo conceitual. Cada variável latente possui um conjunto de variáveis que podem ser mensuradas (as V_m) e que explicam o construto, identificado no diagrama pelas cores amarelas.

Aparecem dois tipos principais de variáveis:

- Variável Exógena – resultados obtidos diretamente das suas V_m ,
- Variável Endógena – resultados compostos das suas V_m ou de outras V_l .

As setas indicam que uma variável é a causa da outra, portanto todos os casos apresentados neste diagrama são de um modelo formativo, tanto das V_m para as V_l quanto entre V_l . No caso das V_l o construto da esquerda é uma causa e justifica o construto à direita.

Os valores são resultantes neste caso de avaliações de profissionais sobre o instrumento de avaliação na forma de afirmativas associadas aos construtos em uma escala de 1 a 5.

Os valores encontrados nas setas que saem das variáveis mensuráveis para as variáveis latentes são cargas fatoriais oriundas do processo de regressão por mínimos quadrados parciais do modelo apresentado. Quanto mais próximo do valor 1 melhor o resultado dessas cargas fatoriais. Entretanto, o equilíbrio entre os valores é relevante, e nenhum deve ser o valor máximo que é igual a 1.

2.3.4 Método validação do modelo proposto

Como referenciais no tratamento dos resultados para validação dos modelos propostos foi utilizado um conjunto de textos, e principalmente os trabalhos de Hair, J.F. (HAIR et al., 2009; HAIR et al., 2012; HAIR JOSEPH F, 2016; BARCLAY D., 1995; ASPAROUHOV; MUTHÉN, 2009; DIJKSTRA; HENSELER, 2015; GRACE et al., 2012; TABRI; ELLIOTT, 2012).

O método adotado neste trabalho para avaliar um modelo estrutural segue a aprovação por uma lista de indicadores estatísticos. A Figura 22 apresenta a adaptação do processo proposto por Hair (HAIR JOSEPH F, 2016) para avaliação quanto a modelagem por Equações estruturais.

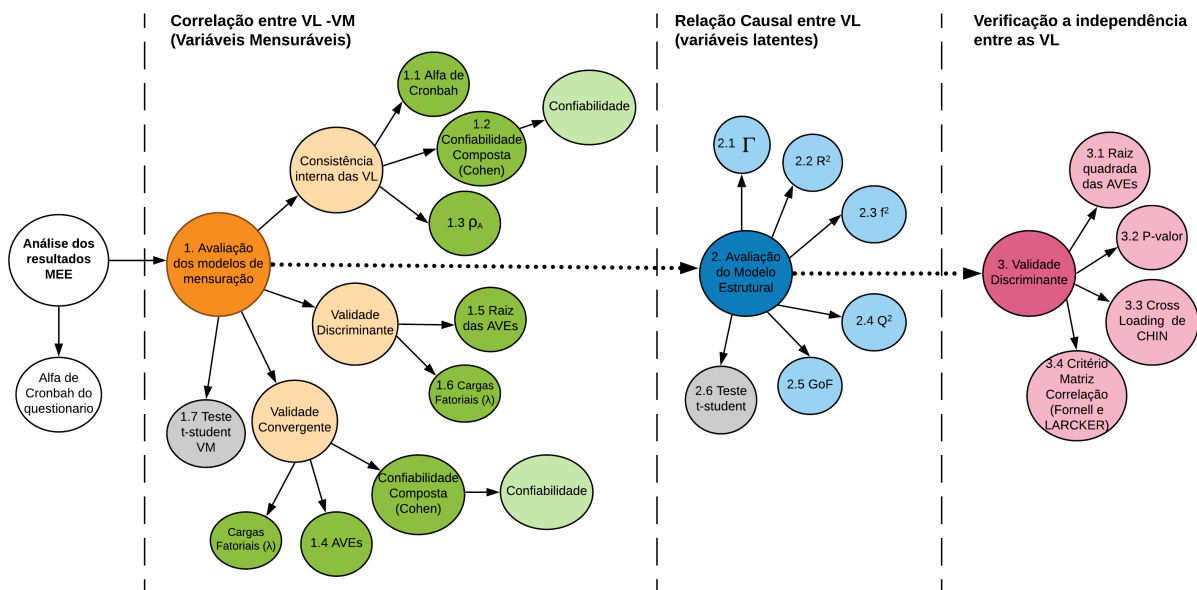


Figura 22 – Modelo diagramático do método de avaliação do modelo estrutural.

Verifica-se na Figura 22 que a validação é feita em etapas, e de forma sequencial. A aceitação é feita pela experiência do analista com o fenômeno em análise ou com resultados similares, apesar dos autores fornecerem valores de referência. Nas seções seguintes serão apresentadas cada uma das fases.

Em seu trabalho Hair (2010) chama a atenção de que algumas pesquisas demonstram que a avaliação por equações estruturais tem um viés de confirmação do modelo quanto ao

ajuste com os dados (HAIR et al., 2009; ROBLES, 1996). Se o modelo proposto tem sempre ajuste aceitável por quaisquer critérios que sejam aplicados, em realidade o pesquisador não conseguiu demonstrar que o modelo proposto é aceitável, apenas confirmou que é um entre diversos possíveis modelos aceitáveis. Portanto, para ser mais rigoroso o teste deve ser por comparação com modelos alternativos. A comparação com modelos concorrentes e que tenham hipóteses verdadeiramente diferentes é o teste mais forte para identificar o melhor dos modelos.

2.3.4.1 Avaliação da Validade Convergente

A Validade Convergente avalia o grau em que duas variáveis medidas (V_m) do mesmo conceito (V_l) estão correlacionadas. Mede a extensão em que a escala se correlaciona positivamente com outras medidas do mesmo construto (BARCLAY D., 1995).

A Validade Convergente é avaliada pelos parâmetros:

- Cargas fatoriais,
- Confiabilidade Composta,
- Raiz da *Average Variance Extracted* (AVE).

A confiabilidade é o resultado complementar do erro de mensuração. A Eq.2.21 apresenta o cálculo da Confiabilidade:

$$Confiabilidade = \frac{(\lambda_{yi})^2}{(\lambda_{yi})^2 + VAR(\eta_y)} \quad (2.21)$$

onde y identifica uma V_l em um conjunto de V_l , i identifica uma V_m em um conjunto de V_m , e η refere-se a V_l que está sendo analisada.

A Confiabilidade Composta (CC) refere-se ao grau de consistência que as V_l obtém com a sua mensuração feita, ou seja, extensão em que as V_m "compartilham" uma V_l em sua mensuração.

A Eq 2.22 apresenta o cálculo da Confiabilidade Composta (CC)

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^p (\lambda_{yi})^2}{\sum_{i=1}^p (\lambda_{yi})^2 + \sum_{i=1}^p VAR(\eta_i)} \quad (2.22)$$

onde p é a quantidade total de V_m .

A *Average Variance Extracted* (AVE) indica a extensão na qual uma V_l está diferente das outras V_l . Pela raiz da AVE caracteriza-se o quanto uma V_l captura um fenômeno (indicado pelo modelo estrutural) sem a representação das outras V_l s.

A Eq.2.23 apresenta o cálculo da *Average Variance Extracted* (AVE):

$$AVE = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_{yi})^2}{\sum_{i=1}^n (\lambda_{yi})^2 + \sum_{i=1}^n VAR(\eta_i)} \quad (2.23)$$

onde n é o número de avaliadores.

2.3.4.2 Avaliação da Validade Discriminante

A Validade Divergente, normalmente denominada Validade Discriminante, consiste no grau em que uma medida não se correlaciona com outras medidas das quais se supõe que deve divergir (SÁNCHEZ FRANCISCO JOSÉ SARABIA, 1999). A validação discriminante verifica o grau em que uma V_i é verdadeiramente diferente das demais.

A Validade Discriminante é avaliada pelos parâmetros:

- Cargas fatoriais (λ),
- Raiz quadrada da *Average Variance Extracted* (AVE),
- Cargas cruzadas.

2.3.4.3 Avaliação da Consistência interna (Confiabilidade)

A Consistência Interna, ou também chamada genericamente por alguns autores de Confiabilidade, é avaliada pelos parâmetros:

- Confiabilidade Composta,
- α de cronbach para as V_m de cada V_i ,
- ρ_A é a confiabilidade da variável preditora (uma V.mensurada ou pode ser uma V. latente exógena).

O indicador ρ_A é calculado pelo valor médio entre a divisão do α de cronbach e a Confiabilidade Composta.

2.3.4.4 Avaliação do Modelo Estrutural pela relação entre as V_i

A avaliação do Modelo Estrutural pela relação entre as V_i é realizada analisando os resultados dos indicadores:

- R^2 - coeficiente de determinação,
- f^2 - Tamanho do efeito

- AIC,
- Q^2 - Relevância Preditiva ou indicador de Stone-Geisser,
- Γ - Coeficiente de Caminho (avaliação das relações causais),
- $t_{student}$

O Coeficiente de Determinação R^2 foi apresentado no capítulo 2, mas no contexto da análise multivariada uma escala de aceitação é apresentada para avaliar o modelo:

- $R^2 > 0,26$ - Satisfatório
- $0,13 < R^2 \leq 0,26$ - Moderado
- $0,02 < R^2 \leq 0,13$ - Fraco

O parâmetro f^2 é o efeito de uma V_i em outra V_i com a qual esta relacionada em um nível mais alto. É a razão entre a parte explicada pelo modelo e a parte não explicada. A Eq.2.24

$$f^2 = \frac{R^2}{1 - R^2} \quad (2.24)$$

na qual R^2 é coeficiente de determinação.

Uma escala de aceitação é apresentada para avaliar o modelo:

- $f^2 > 0,35$ - Grande
- $0,15 < f^2 \leq 0,35$ - Médio
- $0,02 < f^2 \leq 0,15$ - pequeno

A Relevância Preditiva, Q^2 avalia quanto o modelo se aproxima do que se esperava dele (a qualidade da predição do modelo ou acurácia do modelo ajustado)(HAIR JOSEPH F, 2016). O Q^2 é calculado pela Eq.2.25:

$$Q^2 = 1 - (SSE/SSO) \quad (2.25)$$

onde SSE é o *Sum of Square Predictions Errors*, e o SSO é o *Sum of Squares of Observations*. Os Erros de predição são obtidos pela diferença entre os *data points* omitidos e os *data points* previstos.

Os critérios são:

- $Q^2 > 0$
- $Q^2 = 1$ (ideal)

2.3.4.5 Avaliação do Modelo Estrutural pela independência entre as V_l

A avaliação do Modelo Estrutural pela independência entre as V_l é realizada analisando os resultados dos indicadores:

- p-valor,
- Raiz da *Average Variance Extracted* (AVE),
- Cargas cruzadas - a raiz da AVE deve ser maior que as cargas cruzadas,
- Matriz de correlação das V_l de Fornell & Larcker.

O critério para aceitação da matriz de Fornell & Larcker é que a diagonal da matriz de covariância entre V_l deve ter o maior número da linha e da coluna em que está inserido.

2.3.4.6 Avaliação do Modelo Estrutural quanto a interindependências entre V_l e V_m

Os resultados encontrados na matriz de colinearidade do modelo estrutural entre as V_l e V_m podem ser usados para verificar do impacto de uma V_m em uma V_l que não está relacionada diretamente.

Um valor de correlação igual ou superior a 0,9 entre um par de medidas indica a possibilidade de que dois ou mais itens meçam a mesma entidade. Para todos os valores <0,9 não existe problema de multicolinearidade entre os itens.

A matriz de covariância é verificada entre as V_l de um modelo. A diagonal da matriz de covariância deve ter o maior número da linha e da coluna em que está inserido. A diagonal principal é calculada pela Raiz da AVE. Na metodologia proposta por Fornell e Larcker (1981) as raízes quadradas das AVEs devem ser maiores que as correlações dos constructos (BARCLAY D., 1995; HAIR et al., 2012; RINGLE et al., 2018).

2.3.4.7 Avaliação do questionário

Para avaliar a qualidade do formulário de afirmativas será usado o indicador de verificação da consistência α de Cronbach, que mede a correlação entre respostas do questionário, apresentando uma correlação média entre as perguntas. Para calcular aplica-se a Eq. 2.26:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left[\frac{\sigma_n^2 - \sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_n^2} \right] \quad (2.26)$$

onde k é o número de questões e n o número de avaliadores. Na equação a variância de cada coluna k_i da matriz $k \times n$, é a variância relacionada a cada questão, e o outro

termo é a variância da soma de cada linha da matriz, ou seja, a variância da soma das respostas de cada avaliador.

Como é um valor entre 0 e 1 o critério de aceitação para o α de Cronbach varia entre autores quanto ao valor. Para HAIR (HAIR et al., 2009) deve ser $\geq 0,7$, para Al-Rafei (AL-REFAIE, 2013) de $\geq 0,6$. Freitas e Rodrigues (LUIS; FREITAS, 2005) propõe a seguinte escala qualitativa:

- $\alpha \geq 0,30$ - Muito baixa
- $0,30 < \alpha \leq 0,60$ - Baixa
- $0,60 < \alpha \leq 0,75$ - Moderada
- $0,75 < \alpha \leq 0,90$ - Alta
- $\alpha > 0,90$ - Muito Alta

2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo observa-se que o processo de estimação das funções da confiabilidade pode ser abordado por meios conhecidos, mas que podem ser aprimorados pela formulação das funções para otimização, pelos métodos de otimização para convergência de uma solução e pelos critérios de avaliação da qualidade do ajuste do modelo. Os aprimoramentos do processo permitem a observação de outros aspectos quanto a qualidade da seleção do modelo e a estimativa dos seus parâmetros na representatividade do fenômeno analisado. A escolha de um processo é determinante para o que se pretende compreender do fenômeno, o que não significa que a função encontrada representa todos os fenômenos que estão associados a ela.

Nas seções 2.1.4 foram apresentados fatores que afetam a função da confiabilidade escolhida, tanto no processo de coleta e filtragem dos dados experimentais (especialmente os obtidos em campo) quanto o que caracteriza o seu resultado final, as causas das falhas. O processo de seleção de modelo e estimativa de parâmetros sempre será influenciado pelo analista, de forma consciente, como assumida em alguns pressupostos da abordagem bayesiana, ou não percebida no viés do analista, mas pode-se realizar o processo e obter resultados robustos matematicamente sem a entrada inicial do conhecimento de quais são os fatores causais. Nas aplicações de engenharia de confiabilidade os analistas conhecem e esperam o resultado de um modelo, mas em nenhum dos processos conhecidos exige-se o conhecimento dos fatores que influenciam a determinação da função confiabilidade de um componente, equipamento ou sistema. Os engenheiros de confiabilidade devem estar atentos para as simplificações de todo o sistema e compreender melhor os fenômenos que ocorrem para tomar ações mais adequadas na melhoria do sistema.

A Figura 23 apresenta um resumo ilustrativo dos fatores determinantes na função confiabilidade discutidos neste capítulo, que podem representar um caminho para a expressão mais adequada dos resultados.

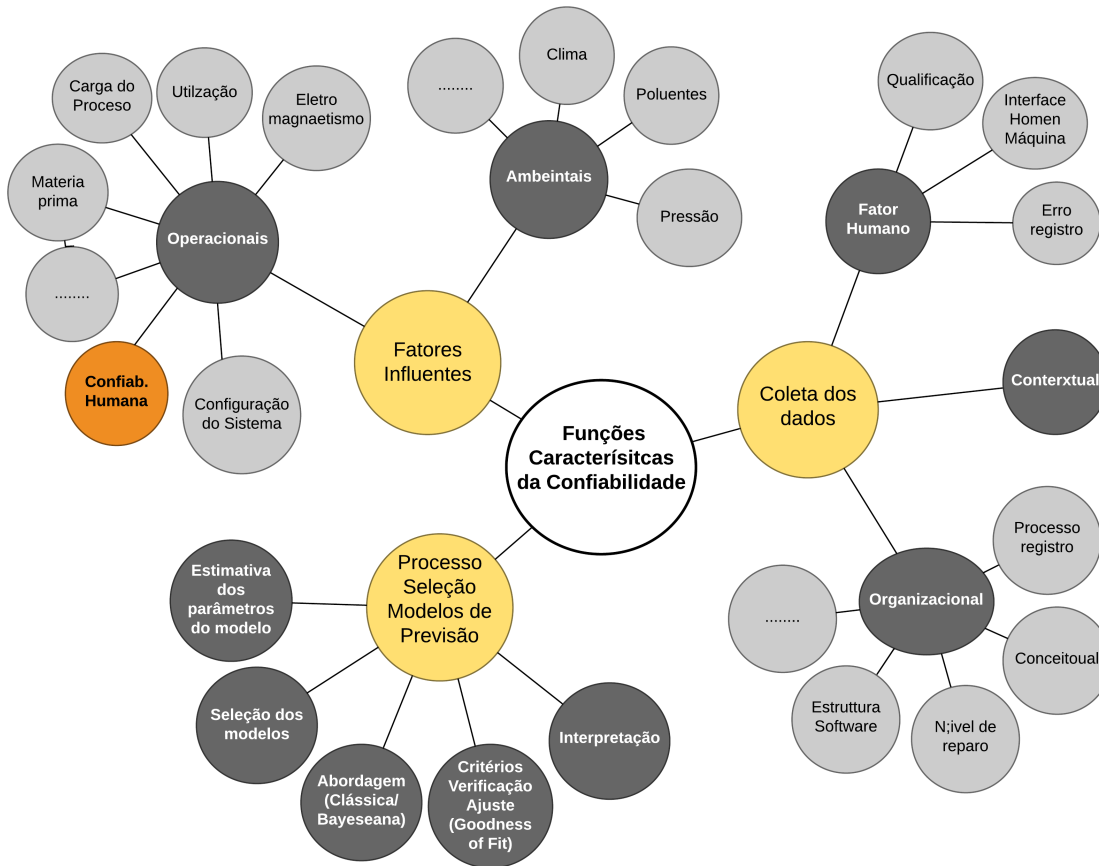


Figura 23 – Fatores determinantes na definição da função confiabilidade

Como verifica-se na Figura 23 são vários os fatores e processos que afetam o resultado final da estimativa da função confiabilidade. Este trabalho irá explorar um dos fatores nos próximos capítulos, que é comum a todas as situações reais, a presença do ser humano no sistema.

Neste capítulo também foram apresentados modelos de análise e avaliação quantitativa da confiabilidade humana. A lista de métodos não foi esgotada, mas caracterizou as linhas principais de atuação para domínio do conhecimento sobre o tema.

Dentre os assuntos do capítulo, foi reservado espaço para os fatores que influenciam o desempenho humano quando executam tarefas no ambiente industrial. Foram apresentadas categorizações e como os fatores são usados nos métodos para avaliação quantitativa. A relevância da identificação dos fatores deve-se a grande variabilidade do desempenho do ser humano quanto ao contexto, portanto, por ser mais sensível do que os sistemas físicos o estudo das oscilações contextuais é importante para a compreensão do fenômeno das falhas humanas.

O capítulo também define a confiabilidade sociotécnica, buscando a origem da expressão e demonstrando a sua atualidade. A expressão representa mais adequadamente o fenômeno que este trabalho quer tratar. O conjunto de agentes que determinam o resultado da confiabilidade é percebido pelos gestores de campo, mas não reconhecido de forma sistematizada.

Este capítulo revisou e também abriu uma discussão sobre o processo de amostragem para a avaliação da confiabilidade em sistemas reais de operações industriais. A condição operacional real não permite separar as ações humanas, das máquinas, do processo produtivo e das condições ambientais, o que torna difícil atribuir a influência de um fator sobre o outro de forma exclusiva, já que atuam ao mesmo tempo, em muitos casos influenciando um ao outro. Para tratar das inter-relações entre as variáveis no processo de amostragem foi apresentada a Modelagem de Equações Estruturais (MEE) que é uma abordagem para problemas multivariáveis.

A revisão sobre Modelagem de Equações Estruturais (MEE) focou nos problemas que esta abordagem se propõe a resolver e nas aplicações em ambientes industriais e mais próximas da do assunto confiabilidade, como por exemplo risco. Não foram encontrados trabalhos com o objeto de estudo a aplicação da confiabilidade de sistemas ou humana, portanto, a aplicação da MEE para melhor compreender os elementos que determinam a confiabilidade foi considerada inovadora.

Na revisão das MEE um ponto relevante tratou sobre o processo de validação dos modelos estruturais propostos. Uma metodologia foi proposta como referência e partindo com um processo de análise confirmatória de um modelo proposto como solução.

O próximo capítulo apresenta duas aplicações da Modelagem de Equações Estruturais (MEE), a primeira sobre as variáveis que formam a amostra para as avaliações de confiabilidade e a segunda sobre as variáveis que determinam a confiabilidade operacional.

3 MEE - MODELAGEM POR EQUAÇÕES ESTRUTURAIS DOS FATORES DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS E DE SUA AMOSTRAGEM

Este capítulo justifica-se pelo seu aspecto inovador quanto a buscar as causas de um problema do ambiente de conhecimento da engenharia de confiabilidade por uma metodologia não encontrada na busca de referências realizada nos periódicos científicos de confiabilidade.

O objetivo do capítulo é propor uma teoria geral para determinar a influência do fator humano na confiabilidade dos equipamentos.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1 Instrumento de avaliação

O protocolo proposto é formado de um conjunto de afirmativas as quais são avaliadas Em uma escala numérica de 1 até 5 na qual o valor 1 aplica sim quando não concorda totalmente com afirmativa e o 5 quando concorda plenamente.

Os profissionais recebem uma orientação no cabeçalho do formulário declarando a escala, e para cada afirmativa que aparece no formulário eletrônico uma escala ao final da frase é disponibilizada para que seja possível selecionar uma opção.

3.1.1.1 Aplicação com o Google form

O início do formulário apresentava uma pergunta sobre o setor industrial em que o respondente trabalhava ou para o qual ele iria considerar as suas respostas, pois alguns dos profissionais que responderam eram Consultores portanto trabalhavam em setores industriais diferentes.

O controle das respostas não foi feito pelos e-mails ou números de telefone. Também não havia nomes relacionados ou seja o respondente Estava à vontade e a análise era cega. Os envios dos formulários eram controlados diariamente de forma a corresponder o setor envolvido com a resposta recebida na planilha eletrônica de controle do sistema *Google forms*. Como exemplo o setor de papel e celulose informava que duas ou três pessoas iriam responder e o formulário era enviado para este grupo de pessoas, enquanto não houvesse a resposta deste grupo não seria enviado a um outro grupo do mesmo setor industrial. Assim as respostas eram controladas por setor industrial e empresa.

3.1.1.2 Perfil dos profissionais respondentes

O perfil dos respondentes dos formulários atendeu aos seguintes critérios: (i) formação educacional considerando existência de carga horária nos conteúdos de probabilidade e

estatística, (ii) experiência trabalhando com o assunto confiabilidade de equipamentos, (iii) estar atuando em empresas do segmento industrial ou na parte Industrial do de serviços, (iv) já ter realizado análises de confiabilidade quantitativas.

Todos engenheiros têm uma formação básica de probabilidade e estatística, portanto são considerados aptos a responder o formulário, mesmo que seja reconhecido que a carga horária nos cursos de engenharia não são suficientes para as competências necessárias para uma análise de confiabilidade. Como exemplo também foram selecionados Profissionais técnicos com formação superior em áreas que deveriam ter na grade curricular conteúdo mínimo de probabilidade e estatística.

No envio dos formulários verificou-se que muitas profissionais estavam alocados nas áreas de manutenção e confiabilidade, porém realizavam apenas análises qualitativas da confiabilidade como análise de causa raiz de falhas. Muitos dos formulários foram reencaminhadas internamente nas empresas para pessoas específicas, pois inicialmente listados reconheciam que não tinham conhecimento suficiente para responder o formulário. Concluiu-se neste processo de envio e interação desta coleta de dados que o número de profissionais atuantes e experientes na realização de análises quantitativas da confiabilidade ainda é pequeno no mercado brasileiro.

3.2 APLICAÇÕES

Foram desenvolvidos dois estudos com objetivo de compreender melhor o modelo inicialmente proposto de elementos determinantes da confiabilidade. O primeiro refere-se ao processo de levantamento de dados para as avaliações de confiabilidade, o que impacta na caracterização da amostragem que será usada na estimativa da função confiabilidade que é o modelo de previsão procurado. O cuidado com a coleta de uma amostra, ou a identificação das restrições no processo de obtenção dos dados, deve ser sempre uma etapa relevante no processo de análise de um fenômeno, especialmente se os dados serão interpretados pela área da matemática estatística e probabilística.

A modelagem por equações estruturais é um caminho para avaliar os fatores que afetam a qualidade da amostra de dados para confiabilidade, pois o processo de análise confirmatória estabelece um conjunto de hipóteses que podem ser julgadas quanto ao impacto de cada uma das variáveis mensuráveis, que neste caso são os fatores que pretende-se avaliar. A aplicação desta modelagem tem vasto uso na avaliação da percepção de comunidades de especialistas a respeito de um determinado assunto, portanto, a experiência da comunidade Brasileira de Engenheiros de confiabilidade será o fundamento para esta avaliação.

O segundo estudo de caso refere-se aos fatores que determinam a confiabilidade operacional, e o objetivo é entender como estes fatores são determinantes entre si.

3.2.1 Modelagem por Equações Estruturais da Caracterização da amostragem para estimativa da confiabilidade de sistemas

O objetivo para o desenvolvimento do modelo conceitual sobre caracterização da amostragem é avaliar o resultado de uma coleta de dados para uso em análises de confiabilidade considerando o novo contexto com um volume de dados cada vez maior.

Deve-se levar em conta que o problema está contextualizado na confiabilidade de sistemas, porém é comum a qualquer estudo que tenha como parte do processo um levantamento de dados de Campo em registros de sistemas computacionais de empresas.

São os seguintes os construtos avaliados ao modelo:

- Caracterização da Amostragem (expectativa de ser a variável endógena),
- Estrutura do Registro,
- Erro Humano,
- Qualificação e treinamento,
- Estrutura Organizacional da Manutenção,
- Contexto Operacional,
- Suporte a qualidade do Registro pela organização,
- Suporte a Análise de Causa Raiz (RCA - *Root Cause Analysis*).

A escolha de cada um desses elementos para compor modelo conceitual leva ao conjunto de hipóteses. A Tabela 10 apresenta os códigos usados para as V_L , e as hipóteses propostas de como as relações entre elas ocorrem.

As relações entre as variáveis latentes representam hipóteses a serem comprovadas quanto à robustez do modelo. A seguir são apresentadas na Tabela 10 as hipóteses assumidas no modelo 9, já que os outros modelos são uma evolução do estudo, portanto, a maior parte das hipóteses são comuns.

Tabela 10 – Construtos propostos, códigos e hipótese propostas para a proposta de análise da amostragem para confiabilidade do modelo 9.

Construto	Código	Hipóteses	
Caracterização da Amostra	CRTAM	H1	ESTRG \Rightarrow CRTAM
		H2	ERRHU \Rightarrow ESTRG
Estrutura do Registro	ESTRG	H3	CTXOP \Rightarrow ESTRG
		H4	SPQDR \Rightarrow ESTRG
Erro Humano	ERRHU	H5	ESTOM \Rightarrow ERRHU
Estrutura Organizacional da Manutenção	ESTOM		
Contexto operacional	CTXOP		
Suporte a Qualidade do registro	SPQDR	H6	QDTRN \Rightarrow SPQDR
Qualificação e Treinamento	QDTRN	H7	SPRCA \Rightarrow QDTRN
Suporte a análise de causas	SPRCA		

As hipóteses propostas são descritas a seguir:

- Hipótese 1: o suporte para a análise de causa raiz é impactante para a qualidade dos registros, portanto é uma entrada para o construto Suporte da Organização para a qualidade dos registros.
- Hipótese 2: o suporte para a qualidade dos registros é uma entrada relevante para a estrutura de registros.
- Hipótese 3: Qualificação e treinamento tem impacto sobre o suporte que é dado pela organização para obter uma melhor qualidade dos registros. Entende-se aqui qualidade dos registros como o preenchimento acurado dos fatos ocorridos, identificação de todos os elementos para que o registro esteja completo quanto aos dados usados na análise de confiabilidade, e com uma discriminação de causa e efeito coerente.
- Hipótese 4: A Estrutura Organizacional da Manutenção, ou seja, aspectos como equipe para lançar os registros de falha e ou estrutura de supervisão das equipes que são responsáveis pelos registros, impacta na variável latente erro humano.

- Hipótese 5: Erro Humano- fatores humanos como erros de digitação, erros no uso adequado do código de falha, falta de identificação dos elementos que compõem a descrição da falha (exemplo: local de instalação afetado, data, hora, de máquina parada, etc) afetam a estrutura dos registros.

- Hipótese 6: a estrutura dos registros é relevante para a caracterização da amostragem, ou seja, como o banco de dados é apresentado para quem vai registrar e os campos de registros são relacionados nas tabelas de dados.

- Hipótese 7: O Contexto Operacional é uma variável exógena e é determinante na caracterização da amostragem.

A Tabela 11 apresenta as Variáveis mensuráveis para cada uma das Variáveis latentes propostas no modelo estrutural 9.

Tabela 11 – Lista de V_m - Variáveis mensuráveis do modelo 9

V_l	Variáveis mensuráveis
Caracterização da Amostra	Verificação da significância estatística da amostragem Verificação gráfica dos dados na linha de tempo Verificação por mais de um critério de <i>goodness of fit</i>
Estrutura do Registro	Os registros tem identificação do material substituído Identificação do nível hierárquico do cadastro Registros em níveis diferentes da falha O registro em mais de um software
Erro Humano	Erro humano no registro Fator humano complexidade no registro
Estrutura Organizacional da Manutenção	Complexidade da estrutura organizacional Pressão do tempo Organização da manutenção centralizada e não centralizada
Contexto operacional	Registro da configuração dos equipamentos Registros das condições ambientais Registro do cenário operacional
Suporte a Qualidade do registro	Facilidade do software de manutenção Política de incentivo ao registro
Qualificação e Treinamento	Definição dos conceitos de falha Qualificação dos profissionais para descrever as falhas. Treinamento para usar os formulários de registro
Suporte a análise de causas	Existência de posto de trabalho para registrar as falhas Existência Laboratórios para análise da falha Disponibilização da estrutura laboratorial

3.2.1.1 Protocolo de avaliação das V_m

A Tabela 23 apresenta a lista de afirmativas com os seus respectivos códigos identificadores (ID).

Tabela 12 – Lista de afirmativas do formulário com os códigos e agrupamento nos construtos propostos no modelo conceitual.

VI	ID	Afirmativas
Caracterização da Amostra	ESTT1	É considerado relevante a verificação da significância estatística da amostragem.
	ESTT2	Há verificação gráfica dos dados na linha de tempo, pois é considerado como algo importante.
	ESTT3	A verificação por mais de um critério de <i>goodness of fit</i> é relevante para a análise.
Estrutura do Registro	ORMT1	Os registros das ações de substituição identificam o material substituído.
	ORMT2	As ações de substituições identificam em que nível do cadastro ocorreu a falha.
	ORNV1	Registros em níveis diferentes (sistema, componente, peça) geram dados distintos da falha.
	ORST2	O registro em mais de um software prejudica o controle dos dados.
Erro Humano	FHER1	Ocorrem falhas humanas no registro dos dados (tag sistema, modos de falha, datas e horas).
	FHHI1	A complexidade no processo de registro leva a erros de preenchimento.
Estrutura Organizacional	OTES1	A estrutura organizacional (níveis de liderança diferentes, programadores exclusivos para registros, restrição do uso do formulário) gera dados incorretos ou incompletos.
	OTTP2	Exigência de menor prazo dos serviços prejudica no registros de falhas (restrição de tempo, fadiga).
	ORES1	A organização (centralizada, na área, sites distintos) gera registros diferentes da falha.
Contexto operacional	CXCF1	A configuração dos equipamentos (série, paralelo, stand-by, votação) no momento da falha é registrada.
	CXAM1	As condições ambientais (temperatura, umidade, raios, chuvas) no momento da falha são registradas.
	CXOP1	No momento da falha as informações do cenário operacional (carga, produtos, tensão, cenário de operação) são registradas.
Suporte a Qualidade do registro	ORST1	O software de manutenção facilita o processo de registro.
	OTPL3	Há uma política de incentivo ao registro completo dos dados.

Tabela 13 – Lista de afirmativas disponibilizadas no formulário com os códigos e ou agrupamento nos construtos propostos no modelo conceitual.

VI	ID	Afirmativas
Qualificação e Treinamento	ORMD1	A empresa define os conceitos de falha para registro (defeito, anormalidade, modo, causa, efeito).
	FHQF2	Os profissionais que registram tem qualificação para descrever as falhas.
	FHQF1	Os profissionais que registram as falhas foram treinados para usar os formulários.
Suporte a análise de causas	ORPO1	Há posto de trabalho para o executante registrar as falhas .
	ORLB1	Há laboratórios para análise da falha detalhada (laboratório de análise da fratura, manuais de fabricante, laboratório elétrica ou eletrônica,...).
	ORLB2	A estrutura laboratorial de análise de falha está disponível para as pessoas que registram.

Verifica-se na Tabela 23 que algumas afirmações tem uma escala invertida quanto ao construto que se quer avaliar, como é o caso da afirmativa OTES1 a qual quando o valor é 5, ou seja a maior concordância com afirmação indica que a estrutura organizacional da manutenção está impactando negativamente. Nestes casos no lançamento da planilha o resultado era invertido, saindo de 5 para um ou de 4 para 2. Esta correção foi realizada automaticamente conforme os valores eram lançados e antes de entrar no software de simulação. O objetivo dessas afirmativas com avaliação inversa era de conduzir o respondente a questionamentos em que o mesmo não mantivesse um efeito de responder todas no mesmo sentido e influenciar a pontuação selecionada.

3.2.1.2 Cálculo do tamanho da amostra

Com objetivo de determinar o tamanho da amostra necessária a ser obtida de formulários respondidos foi usado o software G*Power de Faul et al (2009), na versão 3.1.9.4 (FAUL EDGAR ERDFELDER; BUCHNER, 2009). Os resultados foram levantados considerando a amostra para uma análise a priori de uma regressão linear múltipla. Os indicadores são f^2 (efeito do tamanho da amostra) e o $Power=(1 - \beta)$ o poder de identificação da negação da hipótese nula

A Tabela 14 apresenta os resultados simulados no software G-Power para o modelo estrutural 9 de análise da caracterização da amostragem.

Tabela 14 – Definição do tamanho da amostragem para uma regressão linear múltipla Considerando o efeito do tamanho da amostra e o poder de identificação da negação da hipótese nula - Power (1 - β).

f^2	Número de Preditores	Power (1-beta)	F Crítico	Tamanho sugerido da amostra
0,15	3	0,80		77
	4			85
	5		2,3206	92
	7			103
	3	0,95		119
	5		2,28286	138
7			153	
0,20	3	0,80		59
	4			65
	5		2,3583	70
	7			80
	4	0,95		98
	5		2,3063	105
	7			117

Verifica-se na Tabela 14 que alguns resultados não podem ser obtidos para os valores de f^2 e Power usados, respectivamente 0,15/0,20 e 0,80/0,95. Para os interesses deste

trabalho foram considerados como preditores os identificados nos modelos estruturais 9, 10 e 11. Os preditores no caso do modelo estrutural são as variáveis mensuráveis, e que no caso dos modelos propostos são 3 preditores para cada variável latente. A melhor das combinações para dar robustez aos resultados encontrados é que o f^2 seja o menor possível, ou seja, que o tamanho da amostra não seja impactante nos resultados, e que *Power* seja o maior possível, ou seja a região de abrangência que está sendo obtida será a maior possível, neste caso 0,95. Dessa forma são identificados na Tabela 14 valores de tamanho da amostra que variam de 59 a 119.

Amostra final obtida foi de 73 respondentes, das quais foram aproveitadas 72 formulários. Com este resultado foi atendido o tamanho da amostra para um efeito do tamanho (f^2) de 0,20 e para uma abrangência de 0,80.

3.2.1.3 Setores industriais envolvidos

A Figura 24 apresenta a distribuição da quantidade proporcional de respondentes por setor industrial de um total de 73 respostas.

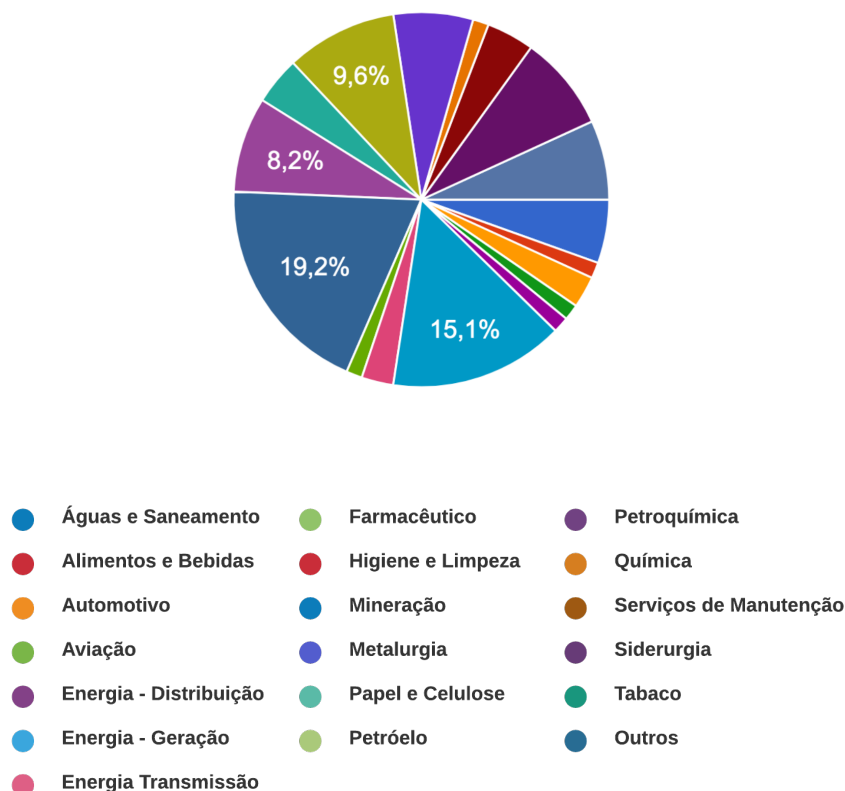


Figura 24 – Distribuição dos setores que participaram das respostas reenviadas.

Verifica-se na Figura 3.2.1.3 a diversidade de setores industriais que participaram da pesquisa nesta amostra, com alguns destaques para áreas como mineração, geração de energia, metalurgia, siderurgia, petroquímica, serviços de manutenção e águas e saneamento.

Esta diversidade foi considerada uma representação adequada do mercado industrial brasileiro, e verificou-se que os destaques foram nos setores mais avançados quanto ao conhecimento e aplicação da confiabilidade de sistemas de produção.

3.2.1.4 Resultados dos formulários

Os resultados dos formulários foram avaliados (i) quanto à distribuição das respostas através de análise gráfica e (ii) quanto à robustez do formulário e das respostas pelo indicador α de Cronbach.

A seguir são apresentados os histogramas com os resumos dos resultados de cada uma das afirmativas na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente). As figuras foram agrupadas pelas Variáveis latentes inicialmente propostas (5 grupos).

FATOR HUMANO

Os profissionais que registram tem qualificação para descrever as falhas.

73 respostas

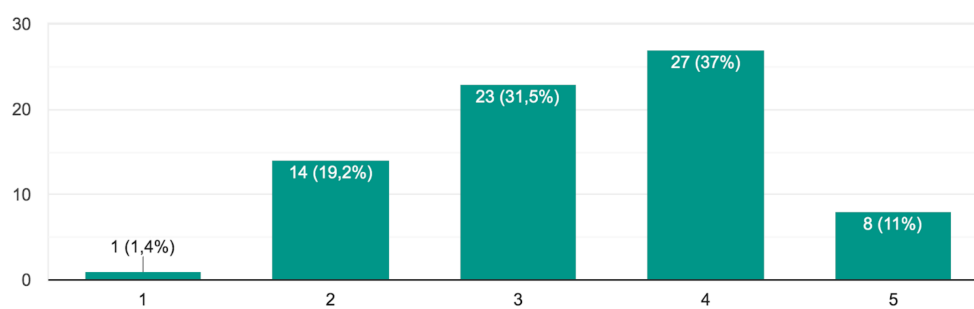


Figura 25 – Resultado da afirmativa (Código FHQF2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Os profissionais que registram as falhas foram treinados para usar os formulários.

73 respostas

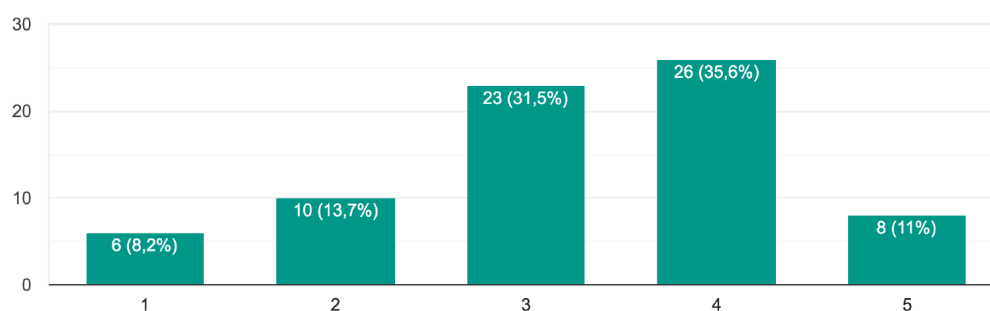


Figura 26 – Resultado da afirmativa (Código FHQF1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

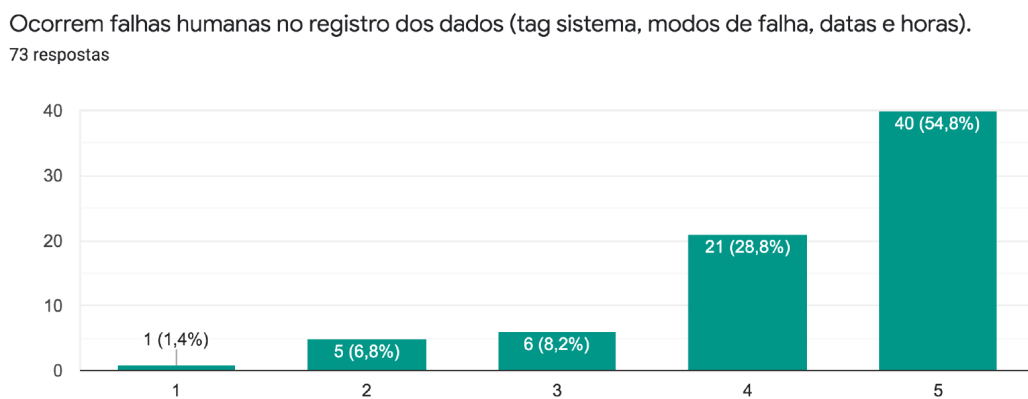


Figura 27 – Resultado da afirmativa (Código FHER1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

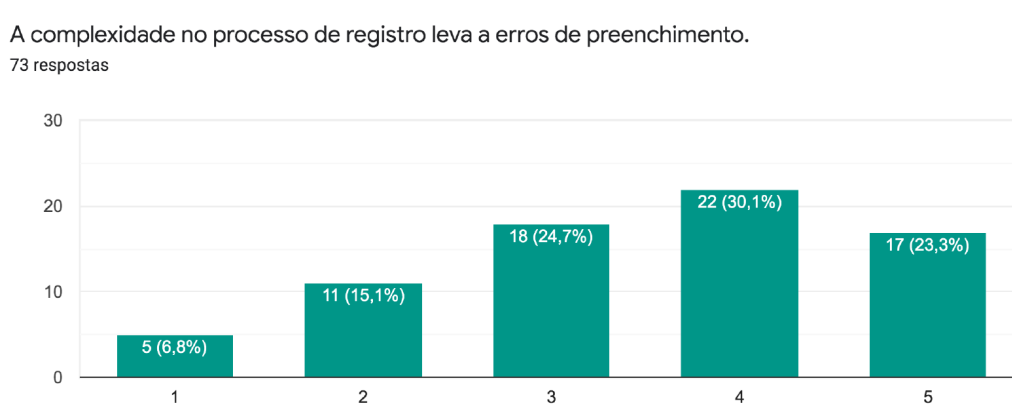


Figura 28 – Resultado da afirmativa (Código FHIH1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

FATOR ORGANIZACIONAL

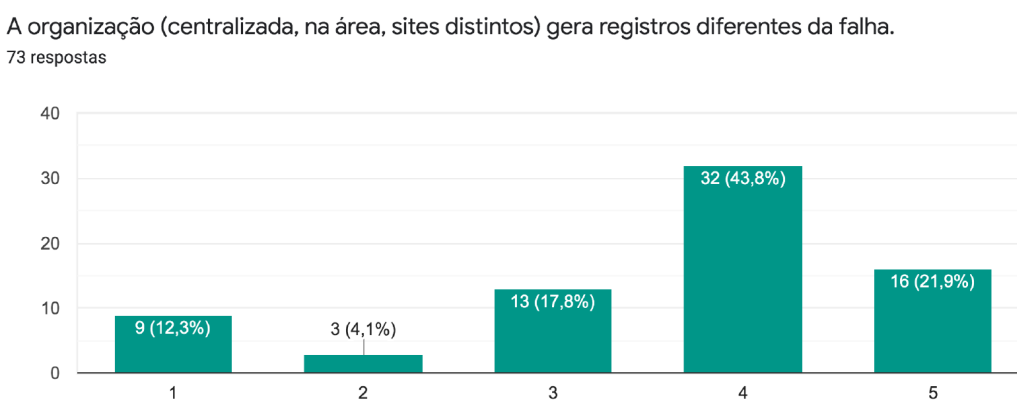


Figura 29 – Resultado da afirmativa (Código ORES1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

A empresa define os conceitos de falha para registro (defeito, anormalidade, modo, causa, efeito).

73 respostas

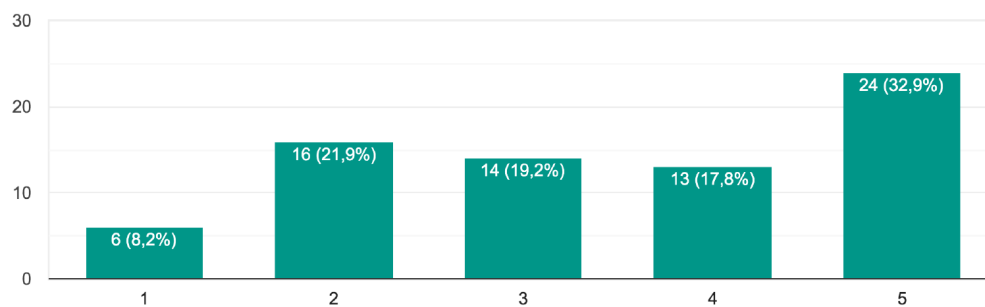


Figura 30 – Resultado da afirmativa (Código ORMD1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Registros em níveis diferentes (sistema, componente, peça) geram dados distintos da falha.

73 respostas

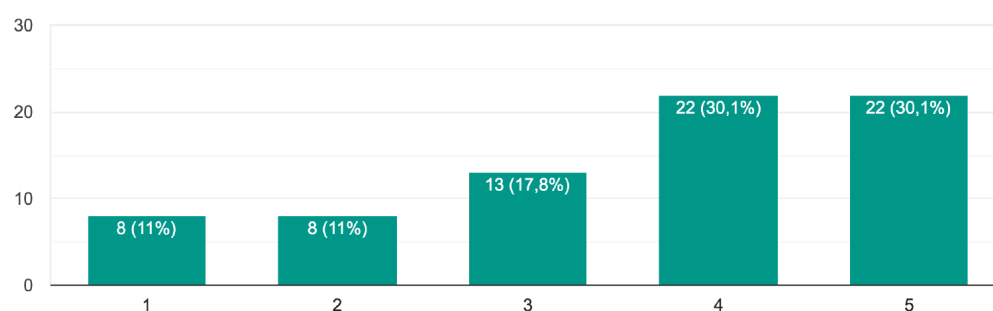


Figura 31 – Resultado da afirmativa (Código ORNV1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Os registros das ações de substituição identificam o material substituído.

73 respostas

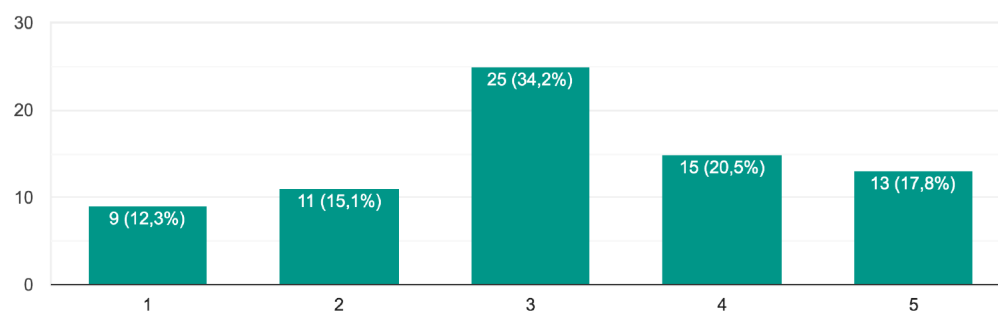


Figura 32 – Resultado da afirmativa (Código ORMT1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

As ações de substituições identificam em que nível do cadastro ocorreu a falha.

73 respostas

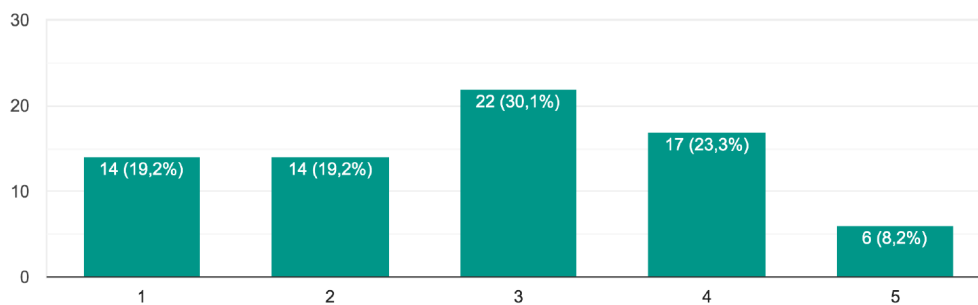


Figura 33 – Resultado da afirmativa (Código ORMT1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

O software de manutenção facilita o processo de registro.

73 respostas

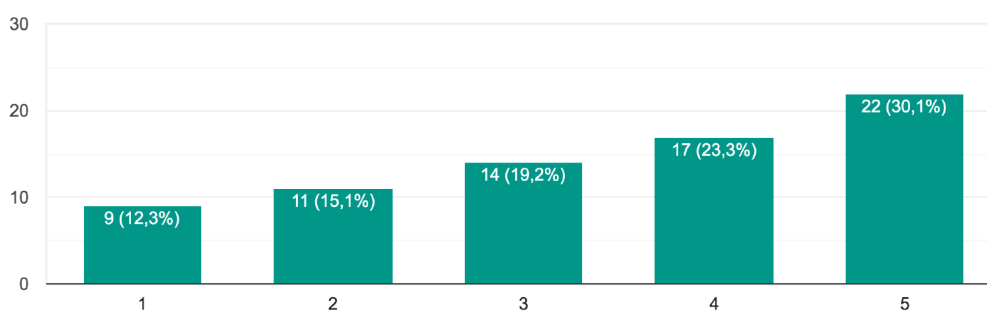


Figura 34 – Resultado da afirmativa (Código ORST1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

O registro em mais de um software prejudica o controle dos dados.

73 respostas

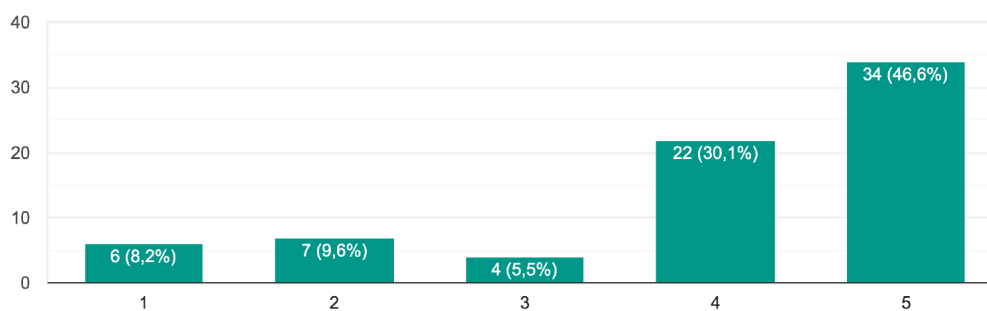


Figura 35 – Resultado da afirmativa (Código ORST2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Há posto de trabalho para o executante registrar as falhas .

73 respostas

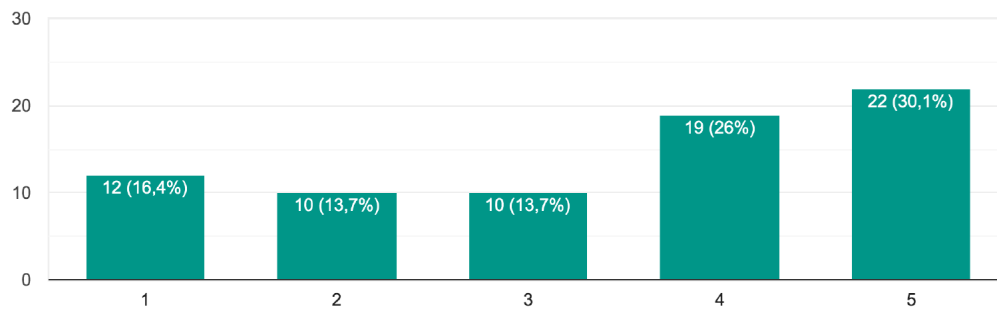


Figura 36 – Resultado da afirmativa (Código ORPO1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Há laboratórios para análise da falha detalhada (laboratório de análise da fratura, manuais de fabricante, laboratório elétrica ou eletrônica,...).

73 respostas

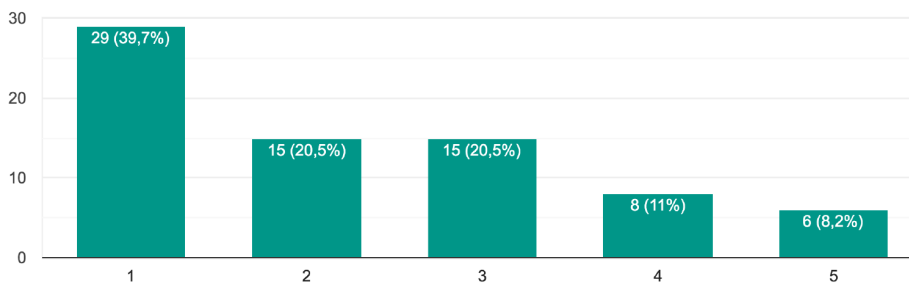


Figura 37 – Resultado da afirmativa (Código ORLB1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

A estrutura laboratorial de análise de falha está disponível para as pessoas que registram.

73 respostas

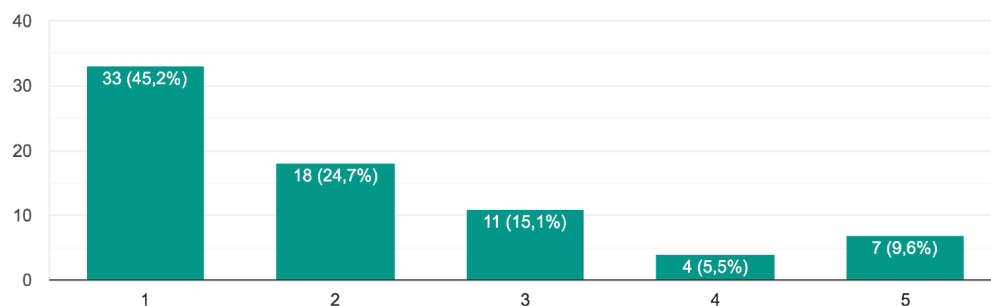


Figura 38 – Resultado da afirmativa (Código ORLB2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

A configuração dos equipamentos (série, paralelo, stand-by, votação) no momento da falha é registrada.

73 respostas

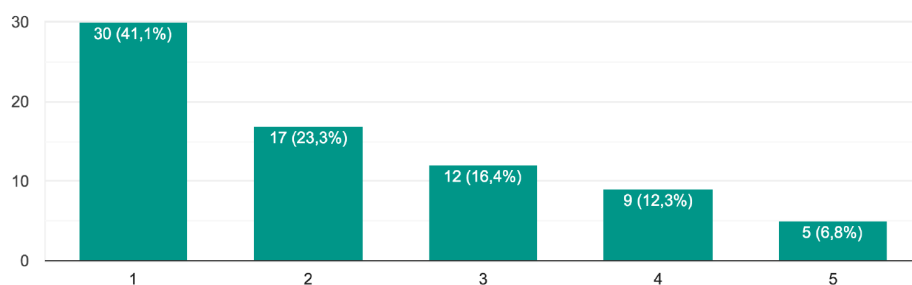


Figura 39 – Resultado da afirmativa (Código CXCF1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

As condições ambientais (temperatura, umidade, raios, chuvas) no momento da falha são registradas.

73 respostas

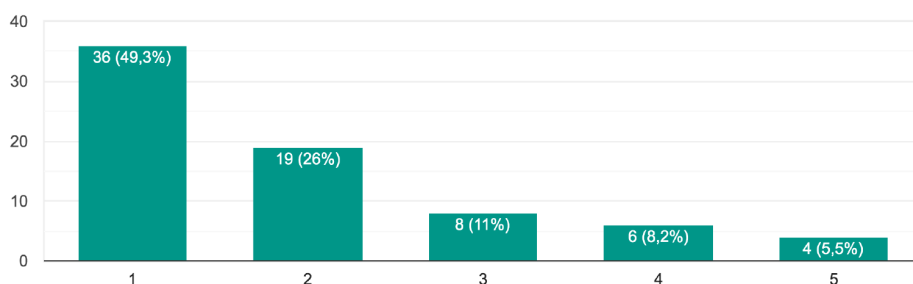


Figura 40 – Resultado da afirmativa (Código CXAM1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

No momento da falha as informações do cenário operacional (carga, produtos, tensão, cenário de operação) são registradas.

73 respostas

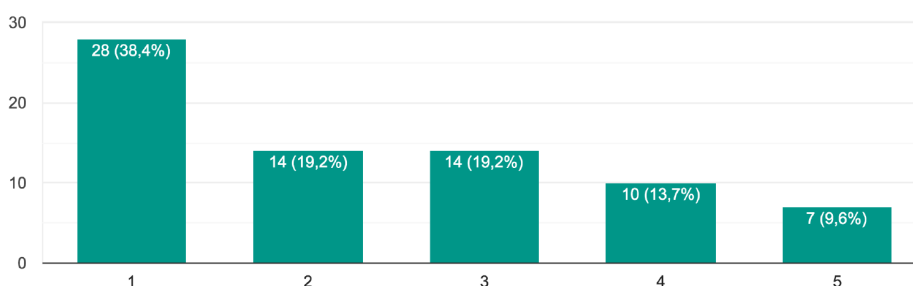


Figura 41 – Resultado da afirmativa (Código CXOP1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

A estrutura organizacional (níveis de liderança diferentes, programadores exclusivos para registros, restrição do uso do formulário) gera dados incorretos ou incompletos.

73 respostas

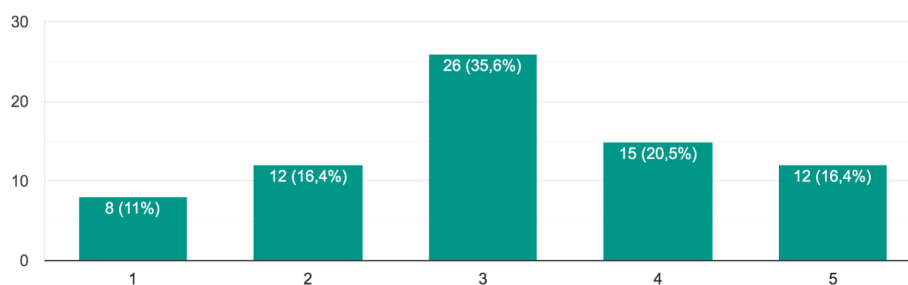


Figura 42 – Resultado da afirmativa (Código OTES1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Exigência de menor prazo dos serviços prejudica no registros de falhas (restrição de tempo, fadiga).

73 respostas

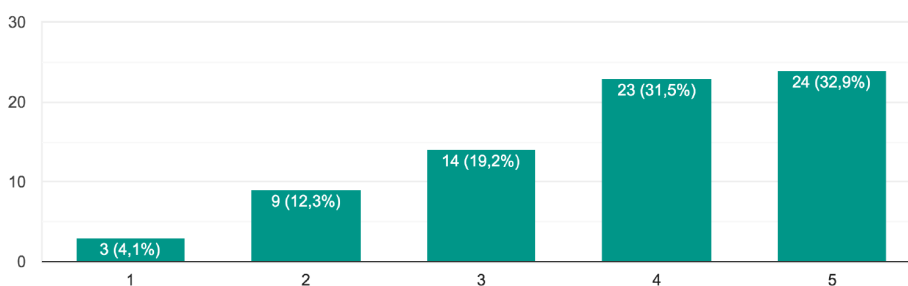


Figura 43 – Resultado da afirmativa (Código OTTP1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Há uma política de incentivo ao registro completo dos dados.

73 respostas

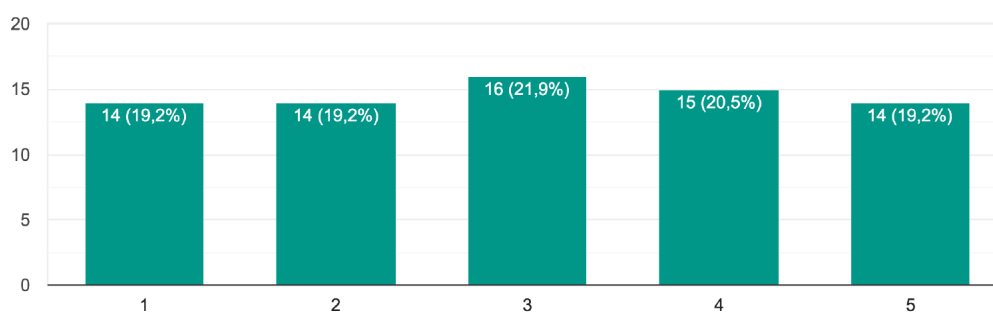


Figura 44 – Resultado da afirmativa (Código OTPL3) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

É considerado relevante a verificação da significância estatística da amostragem.

73 respostas

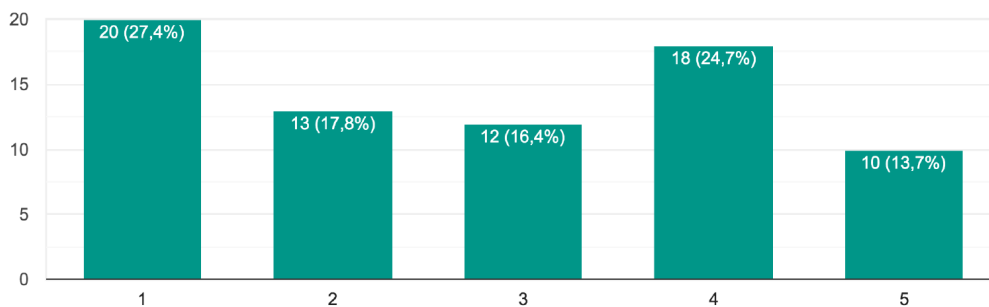


Figura 45 – Resultado da afirmativa (Código ESTT1) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Há verificação gráfica dos dados na linha de tempo, pois é considerado como algo importante.

73 respostas

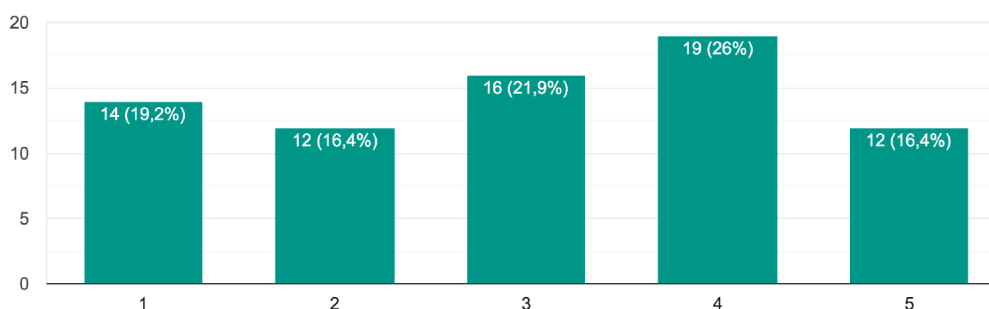


Figura 46 – Resultado da afirmativa (Código ESTT2) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

A verificação por mais de um critério de goodness of fit é relevante para a análise.

73 respostas

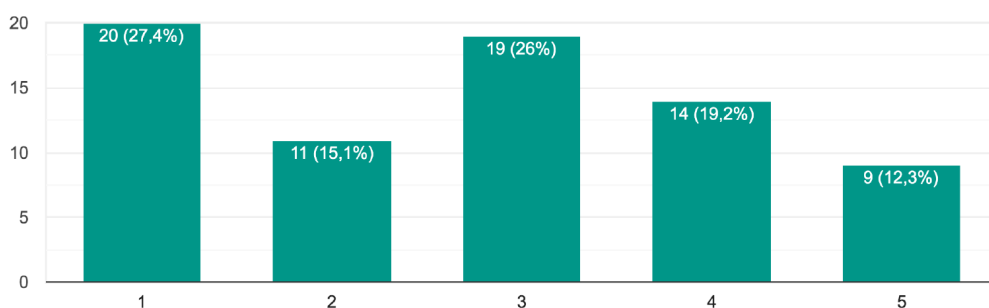


Figura 47 – Resultado da afirmativa (Código ESTT3) do formulário sobre caracterização da amostragem na escala de 1 (não concordo) a 5 (concordo plenamente).

Cálculo do α de Cronbach para o resultado dos formulários

A Tabela 15 apresenta os resultados do α de Cronbach para os questionários com todas as variáveis iniciais, e também uma versão final sem as V_m que foram eliminadas ao longo das análises exploratórias.

Tabela 15 – Indicador α de Cronbach para os resultados obtidos do formulário sobre caracterização da amostragem para a confiabilidade de equipamentos.

	k	k – Vm_ eliminadas
Caracterização da Amostragem	0,79	0,77

Na Tabela 15 k é o número de variáveis mensuráveis do questionário (afirmativas). Como algumas das V_m foram desconsideradas após os desenvolvimento dos modelos estruturais com melhores resultados, foi realizado um outro cálculo para o α de Cronbach sem estas variáveis, e na Tabela 15 aparece na segunda coluna.

Estes resultados atendem aos valores sugeridos pela bibliografia consultada, que assume 0,70 como aceitável. Portanto, os resultados da amostragem realizada considerando a quantidade de variáveis propostas para o modelo estrutural Inicial e para o modelo final atendem a este critério que avalia a robustez e consistência dos resultados do questionário.

3.2.1.5 Resultados dos modelos estruturais da análise sobre Caracterização da amostragem para a confiabilidade

O processo de definição de um modelo estrutural que represente o quanto variáveis selecionadas para o estudo influenciam e são influenciadas é interativo. Partindo de um modelo com o qual realiza-se uma análise confirmatória, posteriormente, realiza-se uma análise exploratória sobre o modelo inicial pelo reposicionamento das variáveis mensuráveis e variáveis latentes, criando novas combinações. Este processo será exemplificado neste trabalho com a apresentação dos três últimos modelos avaliados (modelos estruturais 9, 10 e 11) que representam uma evolução até a solução aceita como final da análise. Portanto, a análise tem momentos em que exploratória e tem momentos em que é confirmatória de uma teoria proposta.

A seguir são apresentados os modelos estruturais trabalhados nas Figuras 48, 49 e 50.

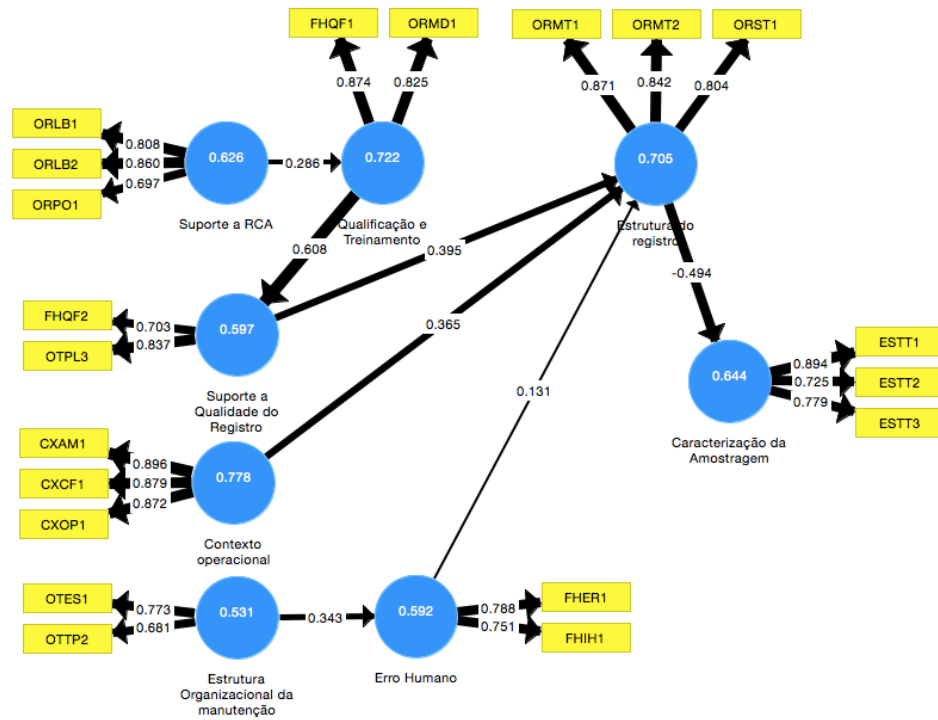


Figura 48 – Modelo estrutural 9 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.

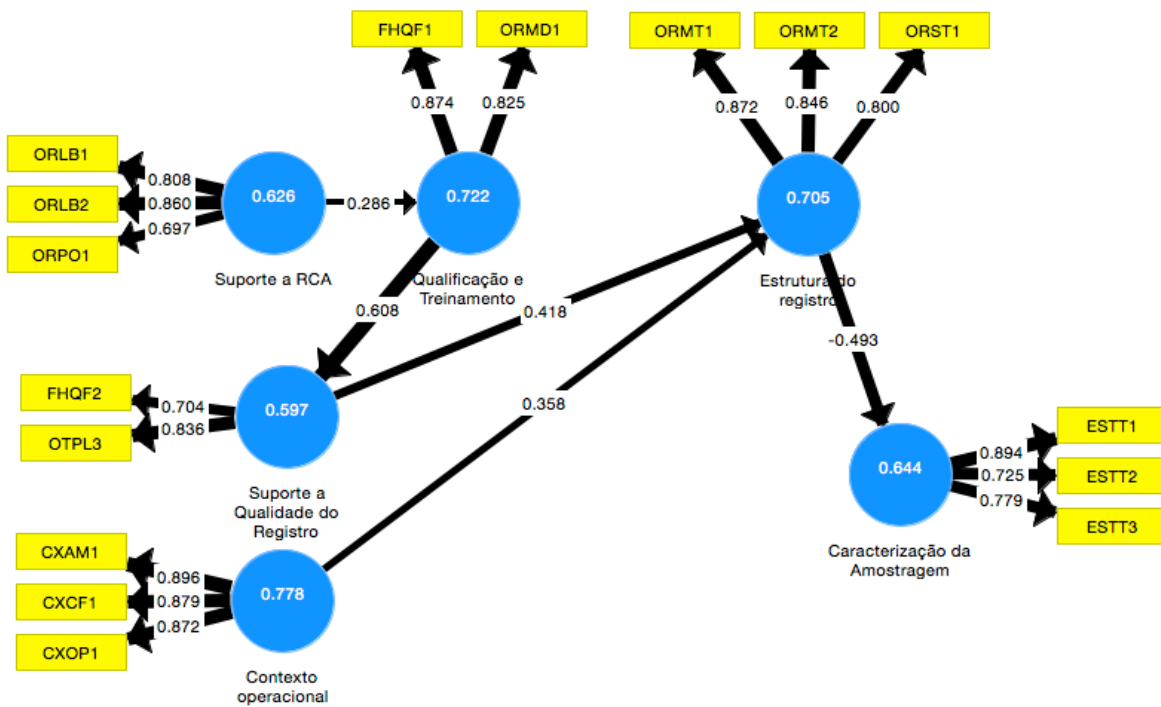


Figura 49 – Modelo estrutural 10 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.

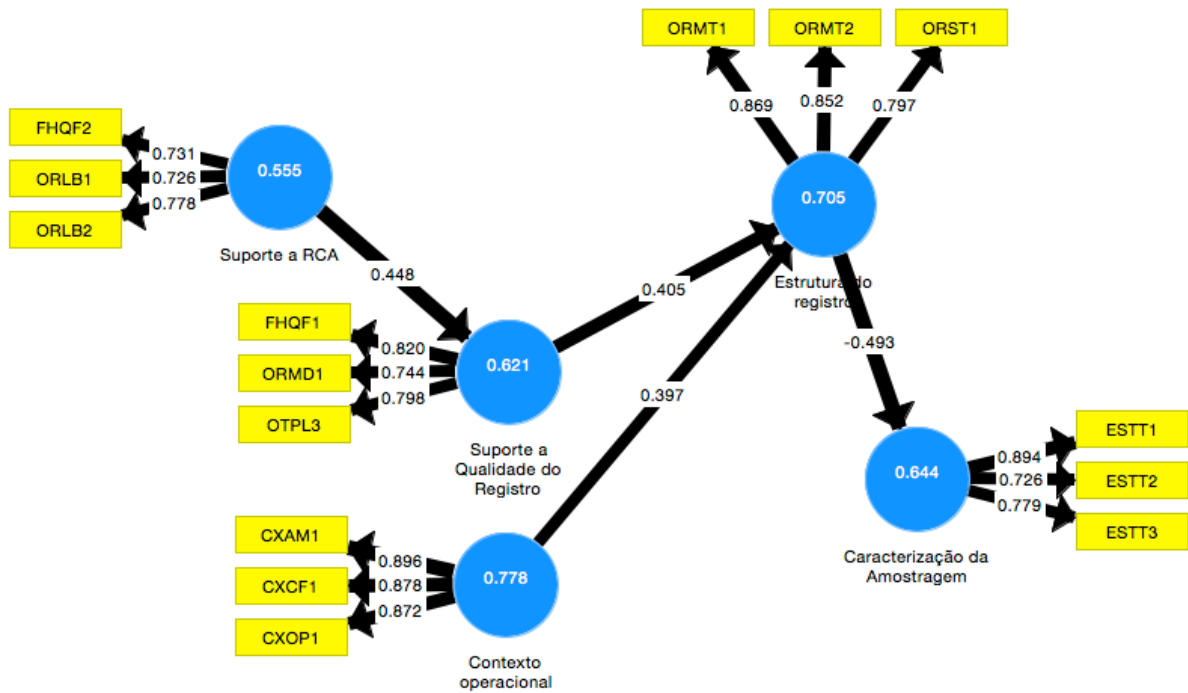


Figura 50 – Modelo estrutural 11 para avaliação da caracterização da amostragem para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.

O modelo estrutural 11 é o resumo e representa uma aproximação para explicar o fenômeno. Como as setas indicam que uma variável é a causa da outra, todos os casos apresentados são de um modelo formativo. Ressalta-se que os valores são resultantes das avaliações das afirmativas do formulário em uma escala de 1 a 5. O equilíbrio entre as cargas fatoriais é relevante, ou seja, os valores não devem ser muito baixos ou muito altos entre eles e nenhum deve ser o valor máximo que é igual a 1. O diagrama apresentado está em equilíbrio quanto às cargas das variáveis mensuráveis nos diversos construtos (variáveis latentes), já que todos os valores encontram-se acima de 0,7.

Verifica-se na Figura 50 o construto 'estrutura do registro' é uma variável endógena (resultado dos outros construtos) e que é a única na determinação da qualidade da amostra. Este foi o melhor resultado possível no modelo para equilibrar as cargas do construto "caracterização da amostragem". A hipótese é que estruturas não adequadas para o registro dos dados (estamos falando da estrutura de dados do sistema computacional que pode incluir manutenção e dados de operação contra vez de algum outro sistema) levam a amostragens incompletas, incorretas quanto aos elementos incluídos no dado como local de instalação, modo de falha, data e hora, e incoerentes quanto a há um padrão estabelecido para causas.

As seções seguintes apresentam os resultados de cada etapa de avaliação dos modelos e que levaram a escolha final.

3.2.1.6 Avaliação da Validade Convergente

Seguindo a metodologia adotada para validação do modelo será avaliada inicialmente a Validade convergente. A avaliação é composta pelos parâmetros Confiabilidade composta, cargas fatoriais e a AVE.

É necessário que as cargas fatoriais sejam superiores a 0,7. Conforme verifica-se na seção 3.2.1.5 nas Figuras 48, 49 e 50 Este critério foi atendido para todos os modelos apresentados.

O outro parâmetro a *Average Variance Extracted* (AVE) tem seus resultados apresentados nas Figuras 51, 52 e 53 para os modelos estruturais 9, 10 e 11.

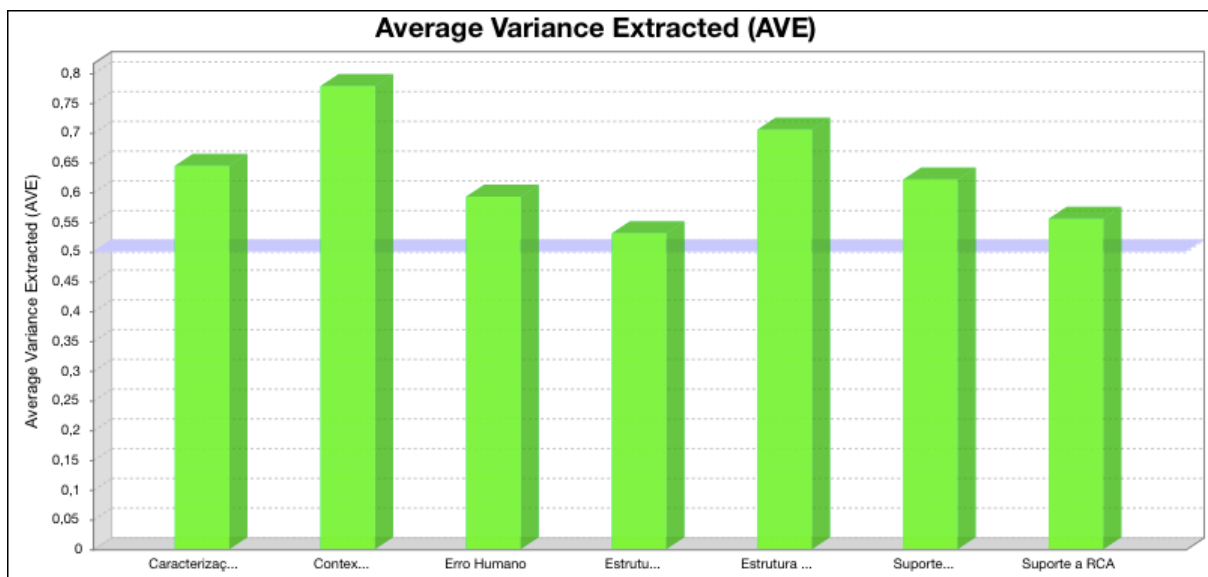


Figura 51 – Resultados do indicador AVE para o Modelo estrutural 9.

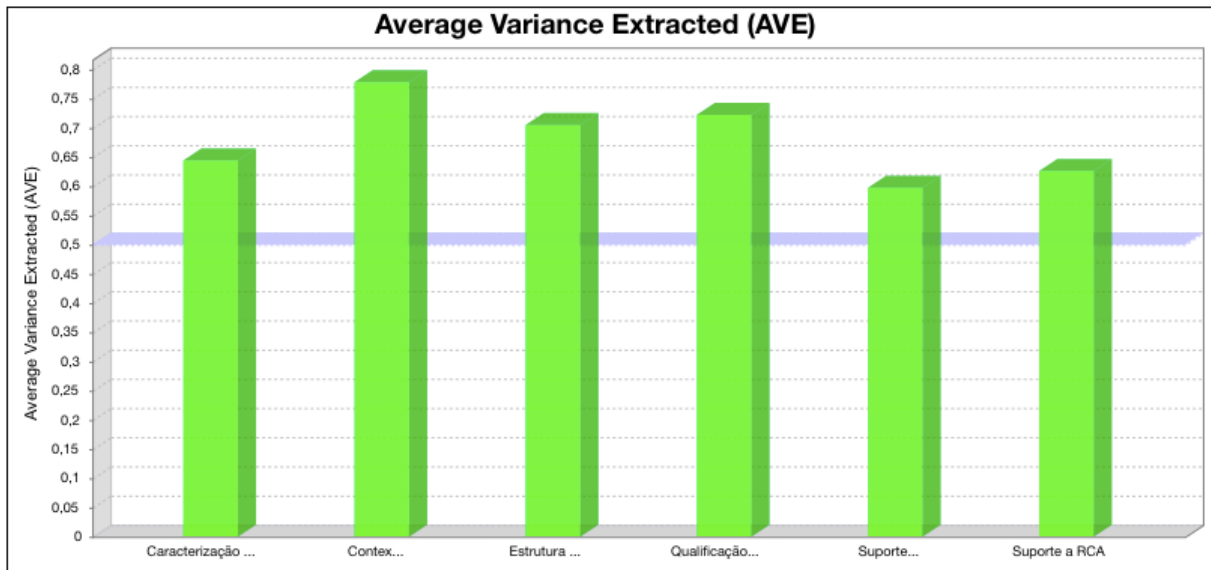


Figura 52 – Resultados do indicador AVE para o Modelo estrutural 10.

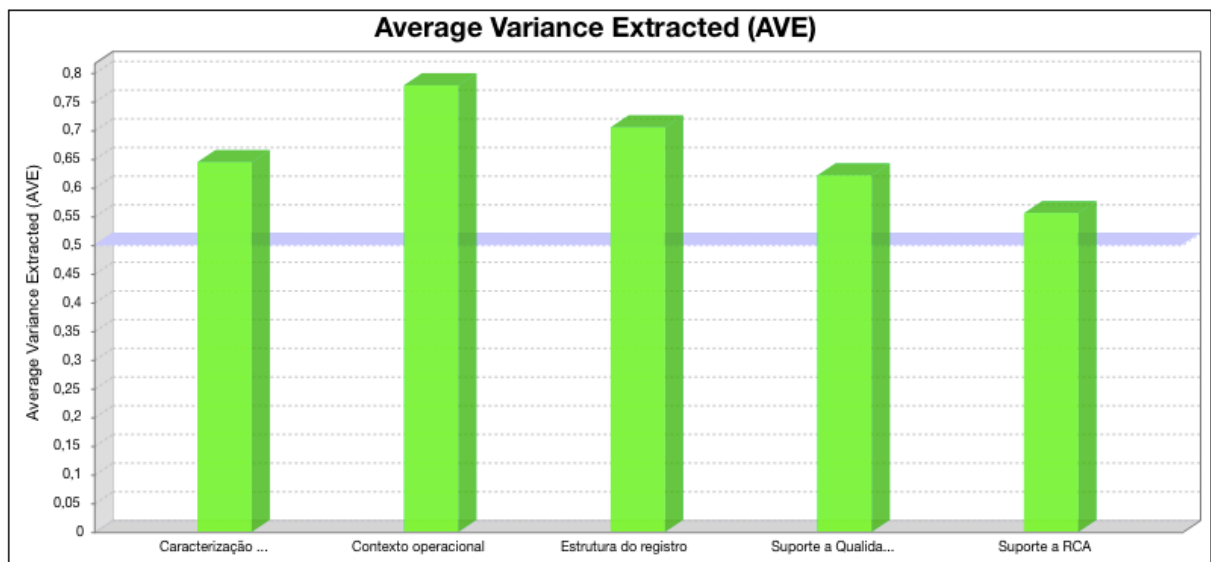


Figura 53 – Resultados do indicador AVE para o Modelo estrutural 11.

Verifica-se que o critério de ser $\leq 0,5$ foi atendido para todas as Variáveis latentes propostas.

Por fim para atender a validade convergente observam-se os resultados da confiabilidade composta. As Figuras 54, 55 e 56 para os modelos estruturais 9, 10 e 11.

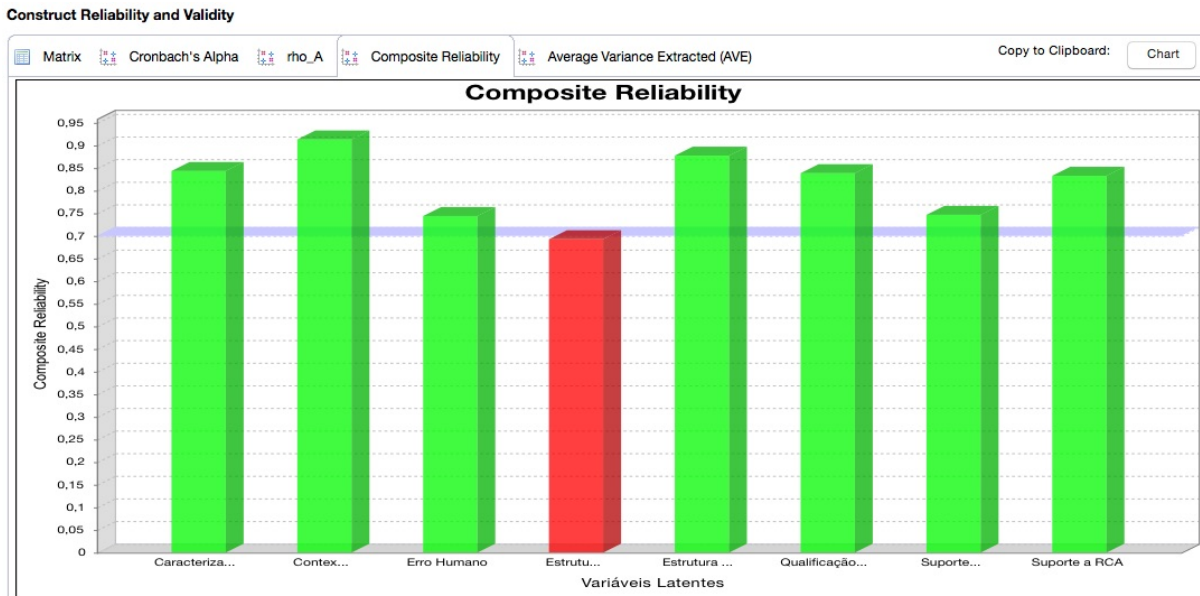


Figura 54 – Resultados parâmetro Confiabilidade Composta para o Modelo estrutural 9.

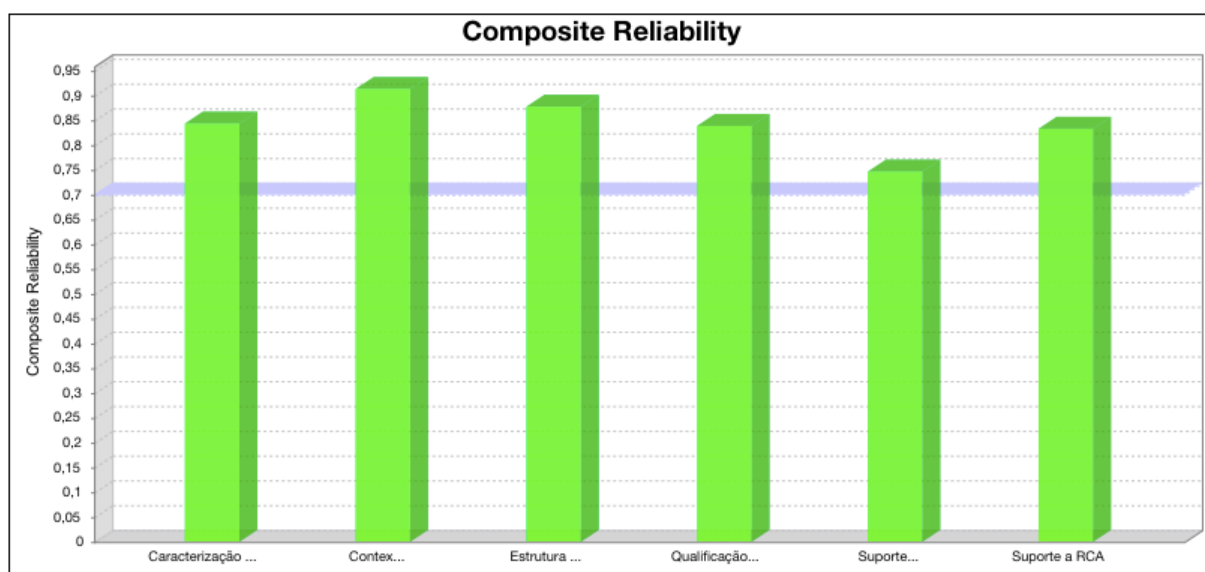


Figura 55 – Resultados do parâmetro Confiabilidade Composta para o Modelo estrutural 10.

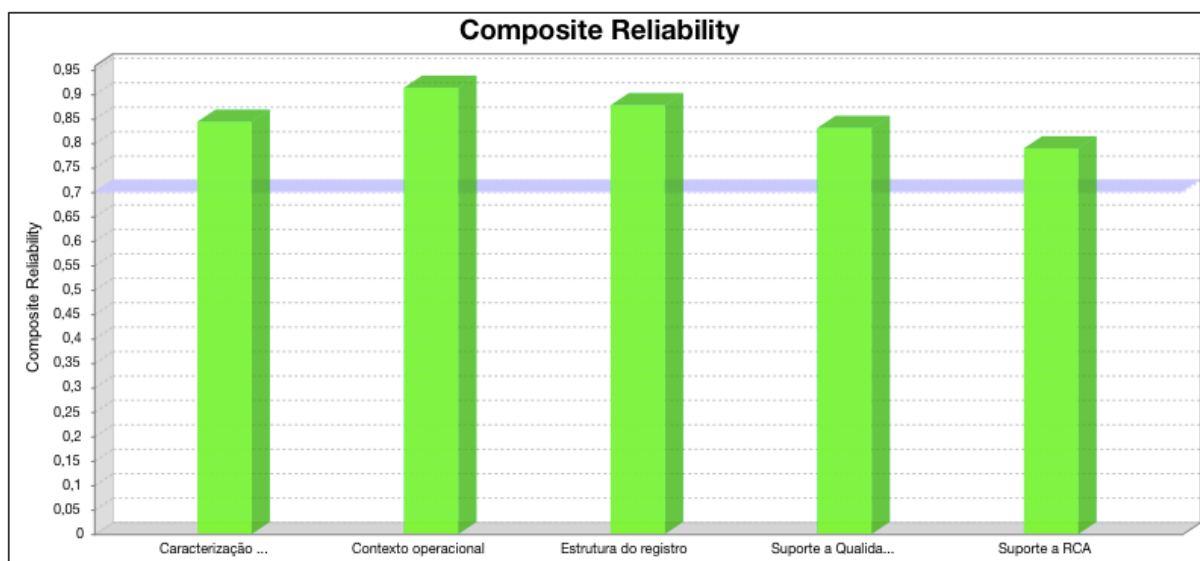


Figura 56 – Resultados do parâmetro Confiabilidade Composta para o Modelo estrutural 11.

Nota-se que no modelo 9 uma das *VI*, Estrutura Organizacional da Manutenção, não atendeu completamente o critério. Porém o valor obtido foi 0,693 e o critério de aceitação é ≤ 0.7 um valor muito próximo, portanto foi considerado aceitável. Assim, todos os parâmetros para a validação convergente foram atendidos para os 3 modelos propostos.

3.2.1.7 Avaliação da Validade Discriminante

A avaliação é composta pelos parâmetros Cargas cruzadas, cargas fatoriais e a raiz da AVE. Os parâmetros cargas fatoriais e AVE já foram apresentados, cabe nesta etapa verificar os resultados das cargas cruzadas. A Tabela 16 apresenta os resultados para o modelo 9.

Tabela 16 – Resultados das cargas cruzadas do modelo estrutural 9.

Indicadores (V_m)	Caracterização da Amostra	Estrutura do Registro	Erro Humano	Organização da Manutenção	Contexto operacional	Suporte a Qualid. do registro	Qualificação e Treinamento	Suporte a RCA
CXAMI	-0,280	0,483	0,021	-0,019	0,896	0,278	0,403	0,240
CXCF1	-0,403	0,543	0,050	-0,059	0,879	0,368	0,501	0,244
CXOP1	-0,341	0,484	0,003	-0,038	0,872	0,157	0,452	0,137
ESTT1	0,894	-0,260	-0,251	-0,113	-0,481	-0,386	-0,412	-0,287
ESTT2	0,725	-0,360	-0,097	0,033	-0,326	-0,454	-0,365	-0,216
ESTT3	0,779	-0,352	-0,047	-0,051	-0,361	-0,222	-0,333	-0,268
FHER1	-0,144	0,080	0,788	0,297	0,120	-0,054	0,134	-0,077
FHH1	-0,131	-0,039	0,751	0,229	0,192	0,055	0,097	0,216
FHQF1	-0,432	0,298	0,090	0,220	0,394	0,874	0,579	0,206
FHQF2	-0,281	0,284	0,112	0,089	0,379	0,428	0,703	0,298
ORLB1	-0,251	0,177	-0,116	-0,078	0,259	0,181	0,235	0,808
ORLB2	-0,255	0,164	0,062	0,063	0,245	0,275	0,367	0,860
ORMD1	-0,302	0,220	-0,107	-0,073	0,413	0,825	0,447	0,287
ORMT1	-0,396	0,590	0,165	0,005	0,871	0,357	0,516	0,323
ORMT2	-0,411	0,484	0,087	0,030	0,842	0,495	0,502	0,263
ORPO1	-0,262	0,230	0,235	0,194	0,308	0,204	0,243	0,697
ORST1	-0,440	0,357	0,258	0,097	0,804	0,342	0,500	0,260
OTES1	-0,173	0,104	0,267	0,773	0,014	0,171	0,220	0,007
OTPL3	-0,420	0,491	0,121	0,204	0,539	0,509	0,837	0,277
OTTP2	0,097	-0,189	0,231	0,681	0,064	-0,042	0,058	0,121

O critério de aceitação neste caso é que a raiz quadrada da AVE deve ser maior que as cargas cruzadas. Seguem os valores das raízes para as V_l e os maiores valores encontrados nas colunas respectivas.

V_l	AVE	Raiz da AVE	Maior valor da coluna	Observações
Caracterização da Amostra	0,644	0,803	0,894	V_m da própria V_l
Estrutura do Registro	0,705	0,840	0,590	critério atendido
Erro Humano	0,592	0,769	0,788	V_m da própria V_l
Organização da Manutenção	0,531	0,729	0,773	V_m da própria V_l
Contexto operacional	0,778	0,882	0,896	V_m da própria V_l
Suporte a Qualidade do registro	0,597	0,773	0,874	V_m FHQF1*
Qualificação e Treinamento	0,722	0,850	0,837	critério atendido
Suporte a RCA	0,626	0,791	0,860	V_m da própria V_l

Tabela 17 – Comparativo das raízes das AVE de cada V_l com as cargas cruzadas

Verifica-se que foi atendido o critério, pois os valores maiores do que a raiz quadrada da AVE foram de V_m da própria V_l . Apenas o caso da V_m FHQF1* que na evolução para o modelo 11 foi mudada para ser parte da V_l Suporte a Qualidade do Registro.

3.2.1.8 Confiabilidade e consistência interna do modelo conceitual e da amostra trabalhada.

Em conformidade com a metodologia adotada para validação do modelo será feita a avaliação da consistência interna dos modelos. A avaliação é composta de pelos parâmetros Confiabilidade Composta (CC), α de Cronbach para as V_m por cada V_l e a ρ_A que é derivada dos parâmetros anteriores. O critério de aceitação é que todos resultados sejam $\geq 0,7$.

A Tabela 21 apresenta a comparação dos resultados para a análise de consistência interna para os três modelos, incluindo a AVE para um resumo dos principais parâmetros para validação dos modelos.

Tabela 18 – Comparativo de resultados da Confiabilidade para os Modelo 9, 10 e 11.

V_i	α			ρ_A			Confiabilidade Composta			AVE		
	Cronbach's			modelos			modelos			modelos		
	9	10	11	9	10	11	9	10	11	9	10	11
Caracterização da Amostragem	0,723	0,723	0,723	0,765	0,765	0,765	0,844	0,844	0,844	0,644	0,644	0,644
Contexto Operacional	0,858	0,858	0,858	0,861	0,861	0,860	0,913	0,877	0,913	0,778	0,778	0,778
Erro Humano	0,313	....	....	0,313	....	....	0,744	....	....	0,592	....	....
Estrutura Organizacional	0,117	....	....	0,119	....	....	0,693	....	....	0,531	....	....
Estrutura do Registro	0,790	0,790	0,790	0,793	0,794	0,794	0,877	0,877	0,877	0,705	0,705	0,705
Qualificação e Treinamento	0,618	0,618	....	0,627	0,627	....	0,839	0,839	....	0,722	0,722	....
Suporte a Qualidade do Registro	0,332	0,332	0,695	0,346	0,346	0,695	0,747	0,747	0,831	0,597	0,597	0,621
Suporte a RCA	0,702	0,702	0,621	0,733	0,733	0,605	0,833	0,833	0,789	0,626	0,626	0,555

Verifica-se que alguns parâmetros de alguns destes modelos não atendem ao critério de aceitação inicialmente adotado. As Figuras 57, 58 e 59 apresentam o resultado para o indicador α de Cronbach.

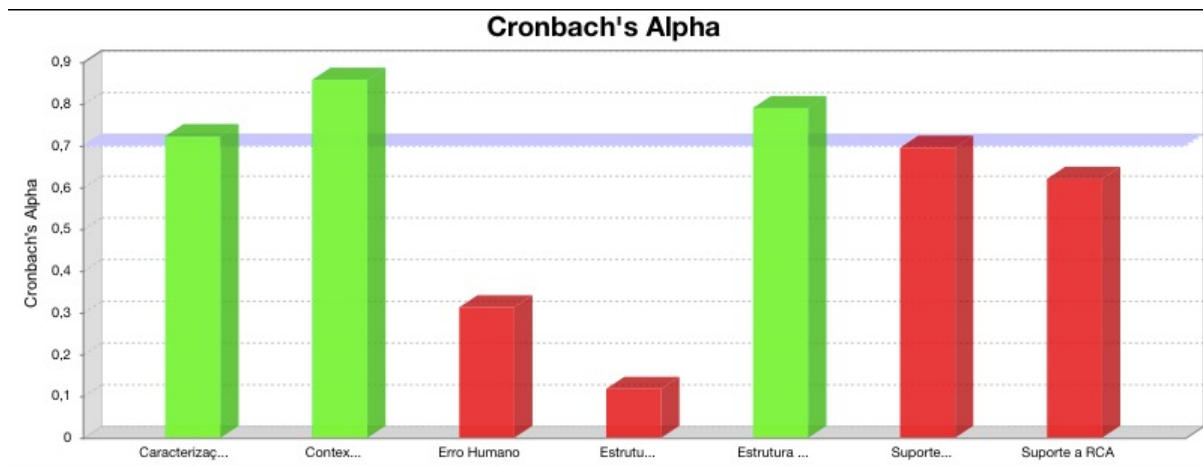


Figura 57 – Resultados do indicador Alfa de Cronbach para o Modelo estrutural 9.

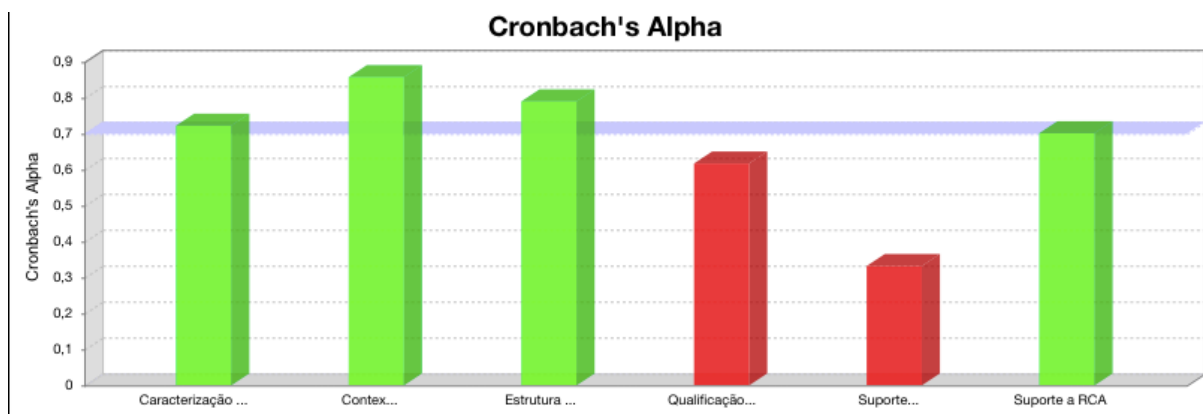


Figura 58 – Resultados do indicador Alfa de Cronbach para o Modelo estrutural 10.

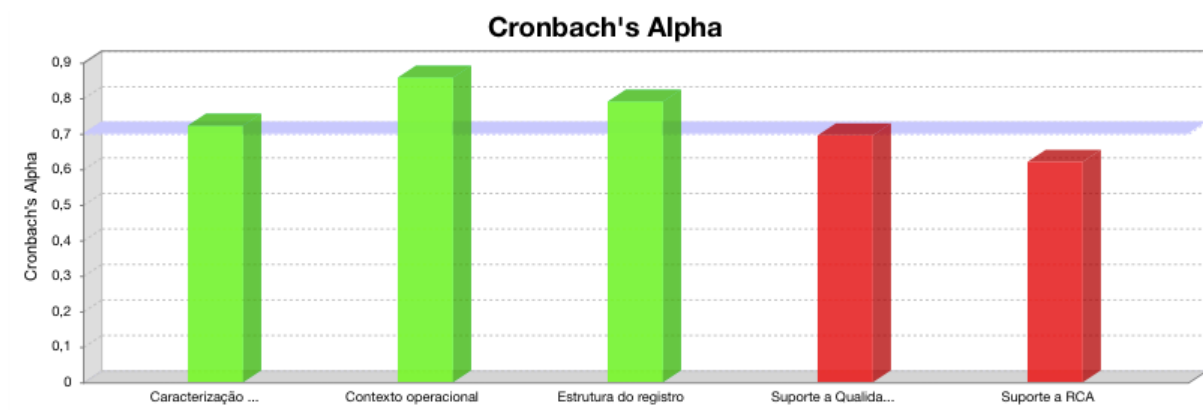


Figura 59 – Resultados do indicador Alfa de Cronbach para o Modelo estrutural 11.

Verifica-se nas Figuras 57, 58 e 59 que o Modelo estrutural 11 obteve os melhores resultados, após a reorganização das V_m e redução das V_l para o indicador α Cronbrach. Mesmo com as ações tomadas os valores estão acima de 0,6, mas abaixo do critério estabelecido. Segundo FREITAS (LUIS; FREITAS, 2005) em vez de adotar um corte para avaliação, é possível assumir uma graduação para o resultado e avaliar outros indicadores para o modelo. Considerando a graduação proposta por RODRIGUES e FREITAS (LUIS; FREITAS, 2005) o que ocorreu foi uma aderência moderada (ver seção 2.3.4.7).

Neste caso serão avaliadas ainda a independência e relação entre as V_l para saber se o modelo proposto é aceitável .

3.2.1.9 Avaliação do Modelo Estrutural pela relação entre as V_l

A avaliação dos modelos pela relação entre as V_l considera os resultados dos parâmetros R^2 , f^2 , AIC, Q^2 (Relevância Preditiva), Γ (Coeficiente de Caminho) e em alguns casos o $t_{student}$

A Tabela 19 apresenta um comparativo entre resultados do critério R^2 para os três modelos.

Tabela 19 – Resultados comparativos do indicador R^2 dos modelos 9, 10 e 11

Variáveis Latentes	R^2		
	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 11
Caracterização da Amostragem	0,244	0,243	0,243
Erro Humano	0,118	.....	.....
Estrutura do Registro	0,474	0,457	0,461
Qualidade e Treinamento	0,082	0,082	.....
Suporte a Qualidade do Registro	0,370	0,370	0,201

Para o coeficiente de determinação (R^2) foi apresentado a análise multivariada uma escala de aceitação. Para o modelo 9, o construto 'Erro Humano' apresentou um resultado baixo ($\leq 0,13$) de ajuste ao modelo, e foi mais um dos critérios para que este construtor tenha sido removido dos modelos 10 e 11. No modelo 10 o construto 'Qualidade e Treinamento' manteve-se com um resultado baixo para o ajuste ao modelo na escala adotada, o que levou a uma nova proposta. No modelo 11 houve uma redução na quantidade de variáveis endógenas, e os resultados encontrados apontam para um resultado satisfatório ($\geq 0,26$) para o modelo na composição do construto 'Estrutura do Registro' e moderado para os outros dois. O construto 'Caracterização da amostragem', foco deste estudo, quase alcançou o status de satisfatório ($R^2=0,243$), o que leva a manter a aceitação do modelo 11.

Os resultados do f^2 são apresentados nas Figuras 60, 61 e 62.

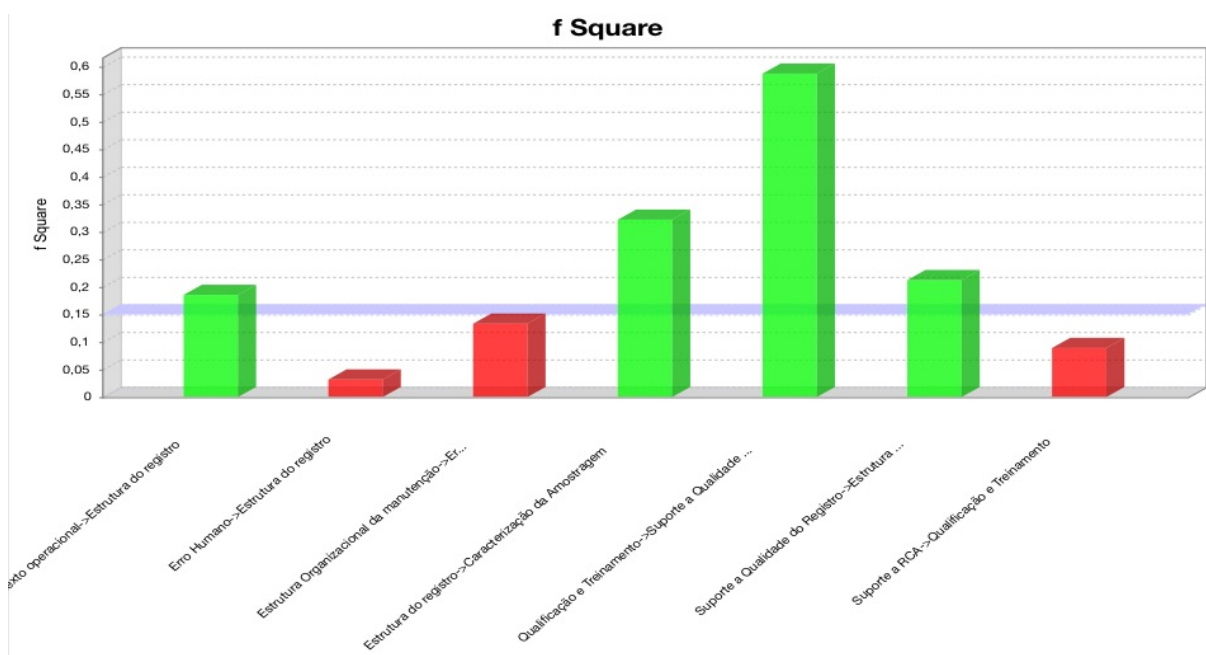


Figura 60 – Resultados do indicador f^2 , para o Modelo estrutural 9.

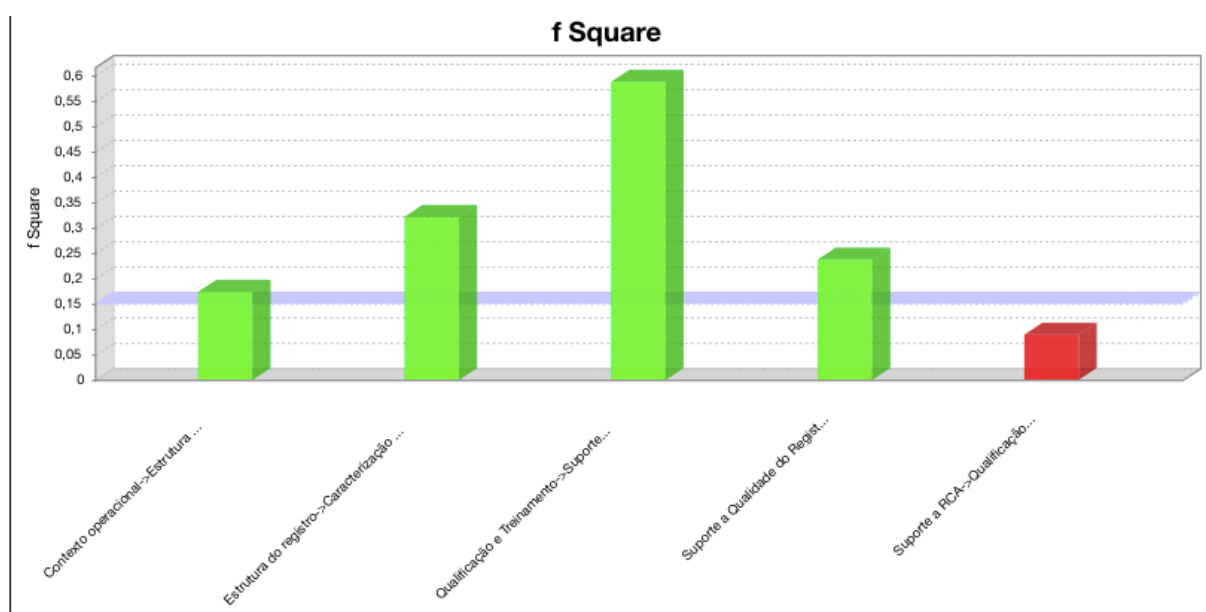


Figura 61 – Resultados do indicador f^2 , para o Modelo estrutural 10.

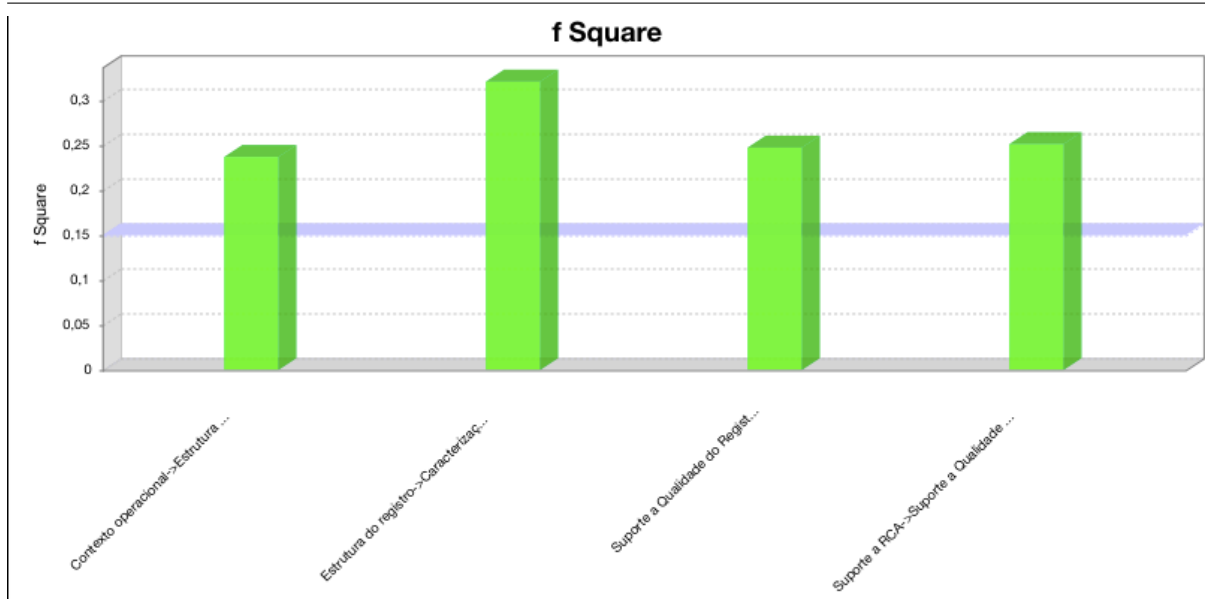


Figura 62 – Resultados do indicador f^2 , para o Modelo estrutural 11.

Dado que foi adotada uma escala de aceitação também para o indicador efeito do tamanho, observa-se que o modelo 9 apresenta alguns construtos com resultados abaixo de 0,15 o que é considerado como pequeno (como exemplo, tamanho do efeito da variável Erro Humano no resultado da V_l Estrutura do registro é pequeno para consolidar a variável no modelo). Já o modelo 11 apresenta todos os resultados no trecho central da faixa dos Médios ($0,15 < f^2 < 0,34$), o que mantém o resultado do modelo 11 como aceitável.

O outro indicador de ajuste é o AIC. Os resultados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados comparativos do indicador AIC dos modelos 9, 10 e 11

Variáveis Latentes	AIC		
	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 11
Caracterização da Amostragem	-16848	-16793	-16785
Estrutura do Registro	-40764	-38388	-38947
Suporte a Qualidade do Registro	-12932	-29815	-12943

Nota-se na Tabela 20 que os resultados obtidos entre os três modelos para este indicador são muito próximos, a exceção da V_l 'Suporte a qualidade do Registro' do Modelo 10 com um resultado muito superior aos outros. Este resultado particular deve-se a presença no modelo 10 de um construto intermediando que foi Qualidade e Treinamento, e que posteriormente foi eliminado.

3.2.1.10 Avaliação do Modelo Estrutural pela independência entre as V_i

Nesta etapa serão avaliados os resultados dos indicadores Raiz da *Average Variance Extracted* (AVE), Cargas cruzadas, Matriz de correlação das V_i de Fornell & Larcker e o p -valor. Como os dois primeiros já foram avaliados inclusive de forma comparativa, apenas os outros dois serão verificados.

Avalia-se o indicador de Fornell & Larcker através da matriz de covariância entre as V_i . As Figuras 63, 64 e 65 apresetam os resultados para os modelos 9, 10 e 11 respectivamente.

Caracterização da Amostragem	Contexto operacional	Erro Humano	Estrutura Organizacional	Qualificação e Treinamento	Qualidade do Registro	RCA
Caracterização da Amostragem	0.803					
Contexto operacional	-0.390	0.882				
Erro Humano	-0.179	0.029	0.770			
Estrutura Organizacional	-0.065	-0.044	0.343	0.729		
Estrutura do registro	-0.494	0.572	0.201	0.051	0.840	
Qualificação e Treinamento	-0.437	0.308	-0.002	0.099	0.473	0.850
Qualidade do Registro	-0.461	0.515	0.150	0.198	0.603	0.608
RCA	-0.322	0.236	0.083	0.082	0.337	0.286
						0.791

Figura 63 – Resultados na matriz Fornell & Larcker para o modelo 9

Caracterização da Amostragem	Contexto operacional	Erro Humano	Estrutura Organizacional	Qualificação e Treinamento	Qualidade do Registro	RCA
Caracterização da Amostragem	0.803					
Contexto operacional	-0.390	0.882				
Estrutura do registro	-0.493	0.573	0.840			
Qualificação e Treinamento	-0.437	0.308	0.474	0.850		
Qualidade do Registro	-0.461	0.515	0.603	0.608	0.773	
RCA	-0.322	0.236	0.337	0.286	0.367	0.791

Figura 64 – Resultados na matriz Fornell & Larcker para o modelo 10

	Caracterização da	Contexto operac	Estrutura do regist	Suporte a Qualida	Suporte a RCA
Caracterização...	0.803				
Contexto opera...	-0.390	0.882			
Estrutura do re...	-0.493	0.573	0.840		
Suporte a Quali...	-0.488	0.434	0.578	0.788	
Suporte a RCA	-0.354	0.290	0.407	0.448	0.745

Figura 65 – Resultados na matriz Fornell & Larcker para o modelo 11

O critério para aceitação da matriz de Fornell & Larcker é que a diagonal da matriz de covariância entre as V_i deve ter o maior número da linha e da coluna em que está inserido. Por este critério os três modelos atendem totalmente.

Quanto ao p -valor, os resultados são para as hipóteses de cada um dos modelos são apresentados nas Figuras 66, 67 e 68.

	Original Sample (O)	Standard Deviation (STDEV)	T Statistics (|O/STDEV|)	P Values
Contexto operacional -> Estrutura do registro	0.393	0.105	3.749	0.000
Erro Humano -> Estrutura do registro	0.172	0.103	1.660	0.097
Estrutura Organizacional da manutenção -> Erro Humano	0.343	0.109	3.153	0.002
Estrutura do registro -> Caracterização da Amostragem	-0.494	0.082	6.013	0.000
Suporte a Qualidade do Registro -> Estrutura do registro	0.399	0.106	3.771	0.000
Suporte a RCA -> Suporte a Qualidade do Registro	0.448	0.074	6.042	0.000

Figura 66 – Resultados do indicador p -valor para as hipóteses do modelo 9

	Original Sample (O)	Standard Deviation (STDEV)	T Statistics (|O/STDEV|)	P Values
Contexto operacional -> Estrutura do registro	0.358	0.119	2.998	0.003
Estrutura do registro -> Caracterização da Amostragem	-0.493	0.080	6.162	0.000
Qualificação e Treinamento -> Suporte a Qualidade do Registro	0.608	0.074	8.201	0.000
Suporte a Qualidade do Registro -> Estrutura do registro	0.418	0.126	3.315	0.001
Suporte a RCA -> Qualificação e Treinamento	0.286	0.102	2.802	0.005

Figura 67 – Resultados do indicador p -valor para as hipóteses do modelo 10

	Original Sample (O)	Standard Deviation (STDEV)	T Statistics (|O/STDEV|)	P Values
Contexto operacional -> Estrutura do registro	0.397	0.104	3.799	0.000
Estrutura do registro -> Caracterização da...	-0.493	0.080	6.145	0.000
Suporte a Qualidade do Registro -> Estrutur...	0.405	0.106	3.810	0.000
Suporte a RCA -> Suporte a Qualidade do...	0.448	0.076	5.927	0.000

Figura 68 – Resultados do indicador p -valor para as hipóteses do modelo 11

Nas Figuras 66, 67 e 68 adotou-se como aceitável para o p -valor resultados ≤ 0.01 .

3.2.1.11 Avaliação do Modelo Estrutural quanto a interdependências entre V_l e V_m

Para avaliar o grau de liberdade entre as variáveis e o efeito da sua influência alguns autores sugerem a análise da colinearidade e da covariância. Apesar de já ter sido aceito o modelo 11 como capaz de explicar o fenômeno, a avaliação foi realizada já que poderia apontar para outros aspectos ainda não percebidos. Tabela 21 apresenta os resultados para as cargas cruzadas do modelo estrutural 9.

Tabela 21 – Comparativo de resultados da Colinearidade das variáveis endógenas e exógenas para os Modelo 9, 10 e 11.

V_i	CRTAM			CTXOP			ERRHU	ESTOM	ESTRG			QDTRN	SPQDR			
	modelos	9	10	11	modelos	9	10	11	modelo	9	10	11	modelo	9	10	11
Caracterização da Amostragem (CRTAM)																
Contexto Operacional (CTXOP)										1,23	1,36	1,23				
Erro Humano (ERRHU)							1,00			1,01						
Estrutura Organizacional (ESTOM)																
Estrutura do Registro (ESTRG)	1,00	1,00	1,00													
Qualificação e Treinamento (QDTRN)																1,00
Suporte a Qualidade do Registro (SPQDR)								1,36		1,23	1,36	1,23				
Suporte a RCA (SPRCA)													1,00	1,00		1,00

Um valor de correlação $\geq 0,9$ indica que as variáveis estejam medindo a mesma entidade. Nesta caso verifica-se que o critério de aceitação foi atendido para todos os modelos.

A covariância das V_i foi apresentada na subseção 3.2.1.10. Avaliando o modelo 11 selecionado verifica-se que as V_i Suporte a qualidade do registro e Contexto operacional possuem covariância de 0,434, um valor que informa uma influência entre duas que deveriam ter maior independência já que são os construtos que formam o caminho único para a Caracterização da amostragem.

3.2.1.12 Conclusões do estudo de caso sobre a caracterização da amostragem para uso nas análises de confiabilidade de sistemas

Da avaliação dos resultados obtidos conclui-se que o modelo 11 foi completamente aceito, e da análise sobre as hipóteses do seu modelo conceitual pode-se inferir os pontos declarados a seguir.

- A variável latente 'Estrutura do registro' é uma variável que influencia negativamente a variável endógena do modelo "Caracterização da amostragem". Este resultado pode ser interpretado como "uma estrutura de um registro ruim/ inadequada/ incompleta cria uma amostra que não atende a aplicação".
- As três variáveis latentes principais (Contexto Operacional, Suporte a Qualidade do Registro, Fator Humano) convergem para uma única variável ("estrutura de registro").
- Os aspectos levantados referentes a erros humanos não conseguiram resultados satisfatórios e a sua carga no resultado final é muito pequena. Este resultado pode indicar que o público que votou, uma amostra de especialistas em confiabilidade de diversos setores econômicos, não concorda que as falhas humanas durante o registro relacionadas à falta de atenção ou conseqüente da complexidade do processo de registro sejam uma causa relevante .
- variável latente "Qualificação e treinamento" tem forte impacto na variável "Suporte à qualidade do registro", o que é considerado intuitivo para o caso.
- A variável latente no 4o nível "Suporte a análise de causa raiz" não teve um resultado satisfatório e apresenta indicadores da análise para modelagem de equações estruturais

O interessante neste resultado é que o erro humano, dito como o mais relevante, na qualidade da amostra não apareceu com um determinante para representar o fenômeno total. O modelo também diz que o contexto operacional (configuração lógica dos equipamentos, carga operacional de ambiente em que está sendo produzido) e o suporte dado para

que os registros sejam adequados (treinamento no formulário de falhas, disponibilidade de acesso ao sistema de registro, qualificação do profissional para registrar) explicam a variável latente "estrutura do registro", duas hipóteses diferentes uma em relação a outra. É estranho a variável latente "contexto operacional" conseguir explicar a variável "estrutura do registro", já que a primeira está associada a produção ou uso do equipamento e a outra com o sistema de processos administrativos e computacionais. A explicação que o modelo apresenta não está na relação direta entre estes dois construtos, mas na relevância do construto "estrutura do registro" na variável que se quer compreender na saída, "caracterização da amostragem".

Quando se trata de dados para confiabilidade é razoável supor que a qualidade das análises de causas, que aparece na variável latente "suporte a RCA", é importante para a qualidade da amostra obtida de dados para as análises de confiabilidade. A hipótese é que uma estrutura que auxilia a realização de análise de causas é importante, ou é parte, do que foi conceituado como um suporte da organização a qualidade dos registros de falhas. Os resultados mostraram que

Trabalhos futuros

Dentre os trabalhos a serem desenvolvidos, deve-se aprofundar o modelo em setores específicos, como mineração, siderurgia e petróleo os mais representativos nesta primeira amostra. A diversidade dos setores industriais envolvidos nas respostas ajudou na identificação da percepção do mercado, entretanto, uma avaliação em um setor específico pode determinar o nível de maturidade do setor quando a capacidade em melhorar a qualidade da amostragem e o entendimento do assunto confiabilidade.

Ao longo do desenvolvimento dos modelos estruturais algumas variáveis mensuráveis foram abandonadas por não haver um consenso nas respostas obtidas, como, por exemplo, o impacto da automação na coleta. Uma nova linha a ser desenvolvida para avaliação poderia incluir estas variáveis modificando as afirmativas ou questões, elaborando de outra forma, ou incluir variáveis que escaparam na primeira avaliação, mas que são desdobramentos dos resultados, como, por exemplo, a qualidade do equipamento e do suporte do fabricante ao registro e análise das falhas. Variáveis como a relação com o fabricante criam novas interações de confiança com o usuário, o que transforma a percepção com o sistema como de maior confiabilidade.

3.2.2 Modelagem por Equações Estruturais dos Fatores determinantes na confiabilidade de sistemas

O capítulo anterior definiu e revisou alguns aspectos da confiabilidade de sistemas, e tratou-se sobre os elementos que determinam a confiabilidade. Um dos ramos identificado refere-se a confiabilidade intrínseca do sistema, incluindo fatores de processo, humano,

organizacional e do ambiente. Nesta seção as variáveis levantadas serão avaliadas quanto a influência em umas determinarem outras, e como uma saída para todo o projeto proposto definir como o fator humano impacta ou é impactado pelos outros elementos.

Foi concebido um modelo conceitual referente aos fatores determinantes na confiabilidade de um sistema. Cinco hipóteses foram levantadas com variáveis latentes representando cinco categorias de fatores:

- organizacional,
- ambiental,
- insumos,
- técnico,
- humano.

Os fatores insumos e humano foram inicialmente tratados com um modelo de mensuração reflexivo, enquanto os outros foram inicialmente adotados como formativos.

Inicialmente as variáveis latentes estavam ligadas diretamente a confiabilidade do sistema como um modelo formativo desta. O modelo conceitual descrito desta forma estabeleceu cinco hipóteses:

- Hipótese 1: o contexto ambiental em que opera o sistema que inclui efeitos da temperatura, umidade, vegetação, poluentes do ambiente e Densidade da população próxima é um fator determinante para a confiabilidade do equipamento .
- Hipótese 2: a organização que tem a posse do ativo físico é determinante na confiabilidade deste porque estabelece políticas de uso (taxa de ocupação por exemplo), de operação e de manutenção.
- Hipótese 3: os sistemas para operarem adequadamente necessitam de entradas de energia e de materiais e a qualidade destes insumos é determinante para a confiabilidade. Neste conjunto foram incluídos como materiais não apenas a matéria-prima que está sendo processada como também fluidos (lubrificantes, gases, fluido hidráulico) e materiais de substituição e de reparos.
- Hipótese 4: fatores intrínsecos ao projeto do equipamento e do sistema envolvido foram englobados na categoria fator técnico. Como são vários itens relacionados ao projeto, foram considerados relevantes para confiabilidade: (i) a configuração lógica do sistema (série, paralelo, em espera, em votação); (ii) o projeto do processo, já que o mesmo equipamento em sistema de processos diferentes podem ter resultados de

confiabilidade distintos; e (iii) os sistemas de automação e controle. A inclusão dos sistemas de automação e controle deve-se a crescente sofisticação e complexidade dos sistemas industriais, que levam a cada vez mais modos de falhas, e portanto, no aumento das demandas no desenvolvimento de análises de risco e confiabilidade para que considerem todos os cenários operacionais possíveis de ocorrer (WU et al., 2018; ASSIS et al., 2015). Um exemplo são os relés para sistemas elétricos de alta potência que eram eletromecânicos e desempenhavam de 3 a 5 funções, e os atuais relés digitais que desempenham até 25 funções.

- Hipótese 5: em qualquer sistema existe a interação humana na operação, na manutenção e serviços no sistema, portanto esta interação será identificada como fator humano que é determinante para os valores da confiabilidade.

Estas hipóteses serviram como primeiro modelo para avaliar a significância das relações entre as Variáveis latentes (V_l) e que determinam uma teoria geral para estimação da confiabilidade de sistemas em ambientes industriais.

A Tabela 22 apresenta as Variáveis mensuráveis para cada uma das Variáveis latentes propostas no modelo estrutural 9.

Tabela 22 – Lista de V_m - Variáveis mensuráveis do modelo 15

V_l	V_m - Variáveis mensuráveis
Fator Humano	Falha humana na operação Falha humana na manutenção Falha humana nos serviços
Fator Organizacional	Política de revisões dos ativos físicos Tempo de vida longo em operação Taxa de ocupação do ativo
Fator Insumos	Qualidade materiais consumíveis Qualidade da matéria prima Qualidade da energia
Fator Técnico	Complexidade da automação Configuração lógica dos equipamentos Design do processo produtivo
Fator Ambiental	Temperatura ambiente Umidade Vegetação Poluentes no local de trabalho Proximidade da população vizinha

3.2.2.1 Protocolo de avaliação das V_m e seus resultados

Para avaliar um modelo conceitual foram enviados formulários com afirmativas sobre cada uma das variáveis de mensuração. A Tabela 23 apresenta a lista de afirmativas com os seus respectivos códigos identificadores (ID).

Tabela 23 – Lista de afirmativas do formulário com os códigos e agrupamento nos construtos propostos no modelo conceitual.

V_i	ID	Afirmativas
Humano	FHO01	A equipe de operação é responsável por boa parte das falhas dos equipamentos.
	FHM01	Erros nos serviços de substituição, reparo ou revisão provocam falhas nos equipamentos.
	FHS01	Eu acredito que os serviços de limpeza, lubrificação e reposição de fluidos são inadequados e permitem muitas falhas.
Organizacional	ORR01	A política de revisões adotada na empresa leva a uma confiabilidade mais baixa dos equipamentos.
	ORI01	O tempo de vida dos nossos sistemas já é longo e aumenta a frequência de falhas.
	ORO01	A taxa de ocupação dos equipamentos é determinante para a confiabilidade atual.
Insumos	INF01	Ocorrem falhas humanas no registro dos dados (tag sistema, modos de falha, datas e horas).
	INM01	A complexidade no processo de registro leva a erros de preenchimento.
	INE01	A estrutura organizacional (níveis de liderança diferentes, programadores exclusivos
Técnico	TEC01	complexidade dos nossos sistemas de controle e automação levam a falhas nos nossos equipamentos.
	TEL01	A configuração dos equipamentos (série, paralelo, <i>stand-by</i> , votação) é responsável por grande parte das falhas dos nossos sistemas.
	TEP01	Eu acredito que o design do nosso processo produtivo é um fator causal para a confiabilidade atual dos nossos.
Ambiental	AMB01	A temperatura ambiente influencia fortemente as falhas dos equipamentos.
	AMB02	A umidade afeta significativamente o desempenho dos nossos sistemas quanto a falhas.
	AMB03	Uma das causas mais comuns de falhas está relacionada a vegetação próxima dos equipamentos.
	AMB04	A confiabilidade dos nossos equipamentos é influenciada pelos poluentes no nosso ambiente de trabalho.
	AMB05	A proximidade entre os equipamentos e a população aumenta as falhas dos equipamentos.

Nota-se na Tabela 23 que as afirmativas variam na forma como abordam cada um dos assuntos, pois o objetivo foi ressaltar para os respondentes uma opinião. Esta abordagem tem como objetivo forçar uma decisão não induzida entre as respostas. Diferentemente do formulário referente aos fatores que determinam a caracterização da amostragem de dados para confiabilidade, no qual as afirmativas não definiam uma opinião apenas expressavam uma ideia.

O total de respostas úteis foi menor que o estudo sobre Caracterização da amostragem, finalizando o estudo de elementos determinantes da confiabilidade em 66 respondentes. Esta amostra ainda atende a Tabela 14 com o tamanho da amostra para um efeito do tamanho (f^2) de 0,20 e para uma abrangência de 0,80.

Setores industriais atingidos

Os setores econômicos que se destacaram com maior número de respostas foram Mineração, Siderurgia, Petroquímica, Geração de energia (hidrelétricas), Prestadores de serviços de manutenção e Águas e saneamento

Cálculo do α de Cronbach para o resultado dos formulários

A Tabela 24 apresenta os resultados do α de Cronbach para os formulários com todas as variáveis e também uma versão final sem as V_m que foram eliminadas ao longo das análises exploratórias.

Tabela 24 – Indicador α de Cronbach para os resultados obtidos do formulário sobre elementos determinantes da confiabilidade.

	k	k – V_m eliminadas
Caracterização da Amostragem	0,76	0,74

k é o número de V_m (afirmativas) do questionário.

Algumas das V_m foram desconsideradas após os desenvolvimento dos modelos estruturais com melhores resultados. Na Tabela 24 a segunda coluna apresenta um outro resultado para o α de Cronbach do cálculo sem as variáveis eliminadas.

Estes resultados atendem ao critério de aceitação definido ($\geq 0,70$) que avalia a robustez e consistência dos resultados do questionário.

3.2.3 Resultados do estudo sobre fatores determinantes na confiabilidade de equipamentos

Esta parte do trabalho não apresentará todas as etapas de avaliação do modelo estrutural, nem mesmo o processo de análise exploratória até a escolha do modelo. Serão apresentados os resultados principais, as avaliações dos valores a validação das hipóteses e as análises sobre a capacidade de explicar o fenômeno em estudo.

Apenas o modelo estrutural 15 será apresentado, pois foi o selecionado. A solução proposta no modelo estrutural 15 usou uma variável mensurável a mais, a INM01, no Fator Organizacional que não foi aplicada nos outros modelos testados. Foi o melhor resultado obtido para diversos modelos testados. Entretanto o modelo 15 criou um alinhamento em sequência com duas V_l (Insumos e Organizacional). A solução restringe a interpretação do modelo estrutural resultante, mas ainda assim representa uma interpretação consistente.

Figura 69 apresenta o modelo conceitual 15 proposto para análise confirmatória.

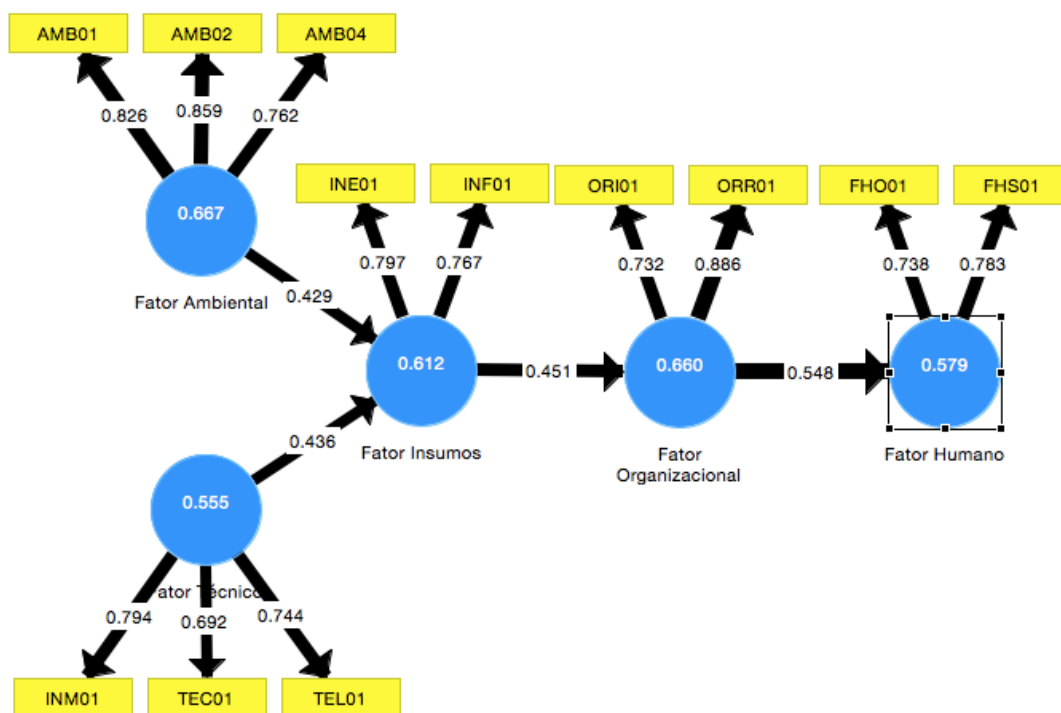


Figura 69 – Modelo estrutural proposto para avaliação dos fatores determinantes para a confiabilidade, com resultados para o indicador AVE, cargas fatoriais.

Verifica-se na Figura 69 que todas as cargas das V_m de cada uma das V_l possuem valores acima do aceitável definido ($\geq 0,7$), exceto a variável TEC01 do Fator Técnico que obteve um valor próximo (0,692), e estão equilibradas em cada uma das V_l (máxima variabilidade entre as cargas de 21%).

As cargas fatoriais entre V_l também estão em equilíbrio quanto aos seus valores.

A Tabela 25 conjuntamente com a Tabela 26 apresentam os principais indicadores para validação do modelo quanto a confiabilidade, consistência interna e validade discriminante.

Tabela 25 – Resultados dos indicadores de consistência interna do modelo estrutural 15 para a análise dos fatores de influência na confiabilidade de equipamentos.

Modelos Estruturais	α Cronbach	ρ_A	Confiabilidade Composta	AVE
Fator Ambiental	0,749	0,748	0,857	0,667
Fator Humano	0,273	0,274	0,733	0,579
Fator Insumos	0,366	0,367	0,759	0,612
Fator Organizacional	0,498	0,545	0,794	0,660
Fator Técnico	0,613	0,632	0,788	0,555

Verifica-se na Tabela 25 que a confiabilidade composta atende ao valor geral definido como critério de aceitação para todas as V_i . Porém os outros indicadores apresentam resultados mais baixos para a maioria das variáveis.

Os fatores Humano, Insumos e Organizacional são variáveis exógenas com poucas V_m o que tende a resultados do indicador α de Cronbach a valores menores (ver Eq.2.26 na qual k é o número de V_m). Pela escala proposta os fatores Insumos e Organizacional tem baixa consistência (0,30 a 0,60) e o Fator Humano muito baixa ($\leq 0,30$). O Indicador ρ_A é calculado pelos indicadores α de Cronbach e Confiabilidade Composta, e nos resultados acompanhou a tendência do α de Cronbach.

A *Average Variance Extracted* (AVE) das V_i tem resultados moderados entre 0,555 a 0,667. O Fator Ambiental e Organizacional podem ser aceitáveis se outros resultados de indicadores do modelo foram satisfatórios. Porém os resultados para os fatores Insumos, Humano e, em especial, o Técnico indicam que os fatores propostos neste modelo estrutural não estão muito diferentes entre si, ou seja, não conseguem capturar o fenômeno que se propõem a avaliar sem a representação dos outros fatores.

Dado que a Validade convergente é uma avaliação das cargas fatoriais, da Confiabilidade Composta e das AVE, as os resultados serão considerados aceitáveis apesar do valores moderados obtidos das AVE.

Para a consistência interna e confiabilidade são avaliados a Confiabilidade Composta, o α de Cronbach e a confiabilidade da variável preditiva, ρ_A já apresentados na Tabela 25. Apesar dos bons resultados da Confiabilidade Composta, os resultados das variáveis exógenas (Humano, Insumos e Organizacional) tem baixa consistência quanto aos outros indicadores. Nesta etapa da validação o modelo proposto não atende plenamente. Porém as variáveis endógenas (Ambiental e Técnica) foram bem definidas atendendo os requisitos, possivelmente por serem mais evidentes aos engenheiros de confiabilidade que participaram

da pesquisa.

Para a Validade Discriminante são observados as cargas fatoriais das V_m , cargas cruzadas e a raiz quadrada da AVE. O menor valor entre as AVE foi 0,555 que tem como raiz quadrada 0,745, atendendo ao critério de ser $\geq 0,7$. As cargas fatoriais foram apresentadas na Tabela 69 e comentadas, atendendo ao critério de aceitação. A Tabela 26 apresenta os resultados das cargas fatoriais das V_l para o modelo estrutural 15.

Tabela 26 – Resultado das cargas fatoriais para o modelo estrutural 15 da análise dos Fatores influentes na confiabilidade operacional.

	Ambiental	Humano	Insumos	Organizacional	Técnico
Fator Ambiental			0,429		
Fator Humano					
Fator Insumos				0,451	
Fator Organizacional		0,548			
Fator Técnico			0,436		

Verifica-se na Tabela 26 que as cargas tem equilíbrio entre elas. Considerando a amostra pequena, uma reamostragem elevou os resultados para acima de 1,0 atendendo também o critério de aceitação.

Por fim, as cargas cruzadas são apresentadas na Figura 70.

	Fator Ambiental	Fator Humano	Fator Insumos	Fator Organizacional	Fator Técnico
AMB01	0.826	0.114	0.309	0.173	-0.110
AMB02	0.859	0.179	0.324	0.130	-0.029
AMB04	0.762	0.290	0.364	0.369	0.031
FHO01	0.468	0.738	0.401	0.399	-0.065
FHS01	-0.073	0.783	0.211	0.434	0.060
INE01	0.356	0.360	0.797	0.328	0.350
INF01	0.286	0.258	0.767	0.380	0.305
INM01	0.042	-0.030	0.390	0.169	0.794
ORI01	0.204	0.315	0.337	0.732	0.252
ORR01	0.254	0.544	0.395	0.886	0.047
TEC01	-0.064	0.034	0.263	0.157	0.692
TEL01	-0.106	0.011	0.252	0.001	0.744

Figura 70 – Resultados das cargas cruzadas do modelo estrutural 15.

Verifica-se na Figura 70 que a V_m ORI01 tem uma carga com o Fator Técnico apesar de ser uma variável do Fator Organizacional. A variável FHO01 do Fator Humano e a ORR01 do Organizacional possuem cargas relevantes para o Ambiental. A variável AMB04 do Fator Ambiental é relevante para o Humano. A FHO01 do Humano, a ORI01 e a ORR01 do Organizacional são relevantes para o Insumos. A variável AMB04 do Fator Ambiental, a FHO01 e a FHS01 do Fator Humano são relevante para o Organizacional. Foram considerados nas avaliações cruzadas anteriores apenas valores acima de 0,250.

Apesar das ponderações das cargas cruzadas, demonstrando interdependência de algumas o modelo foi aceito para a validade discriminante.

Na avaliação da independência entre as V_i s pode ser verificada também a extensão na qual uma V_i está diferente das outras V_i . Nesta etapa da avaliação entram as Cargas Cruzadas, a matriz de Fornell & Larcker, a raiz quadrada da AVE e o p-valor. A Figura 71 apresenta a matriz de covariância entre as V_i ou de Fornell & Larcker.

	Fator Ambiental	Fator Humano	Fator Insumos	Fator Organizacional	Fator Técnico
Fator Ambiental	0.816				
Fator Humano	0.245	0.761			
Fator Insumos	0.411	0.397	0.782		
Fator Organiza...	0.284	0.548	0.451	0.812	
Fator Técnico	-0.040	-0.000	0.419	0.158	0.745

Figura 71 – Resultados da matriz de covariância de Fornell & Larcker do modelo estrutural 15.

Conforme verifica-se na Figura 71 o critério pelo método de Fornell & Larcker foi atendido, pois os valores da diagonal são maiores que todos da coluna.

Os resultados para o p – valor foram todos 0.000 para as relações Ambiental \Rightarrow Insumos, Técnico \Rightarrow Insumos, Insumos \Rightarrow Organizacional, Organizacional \Rightarrow Humano. Portanto o critério para avaliação da independência entre as V_i s para o modelo 15 foi atendido

Para avaliação da relação entre as V_i serão apresentados os indicadores R^2 , coeficiente de determinação, e f^2 , efeito do tamanho. A Figura 72 apresenta os resultados dos R^2 das V_i para o modelo 15:

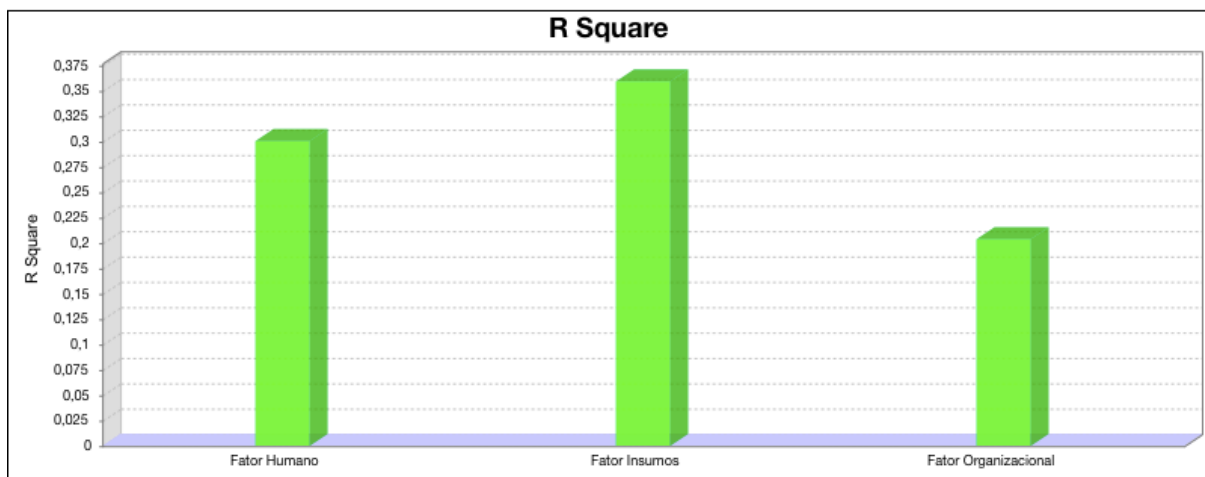


Figura 72 – Resultados do R² do modelo estrutural 15.

Verifica na Figura 72 que os resultados dos R^2 das V_i apresentam, conforme escala definida, o status de Satisfatório quanto ao ajuste da modelagem, e foi uma das razões da seleção do modelo 15.

A Figura 73 apresenta os resultados dos f^2 das V_i para o modelo 15:

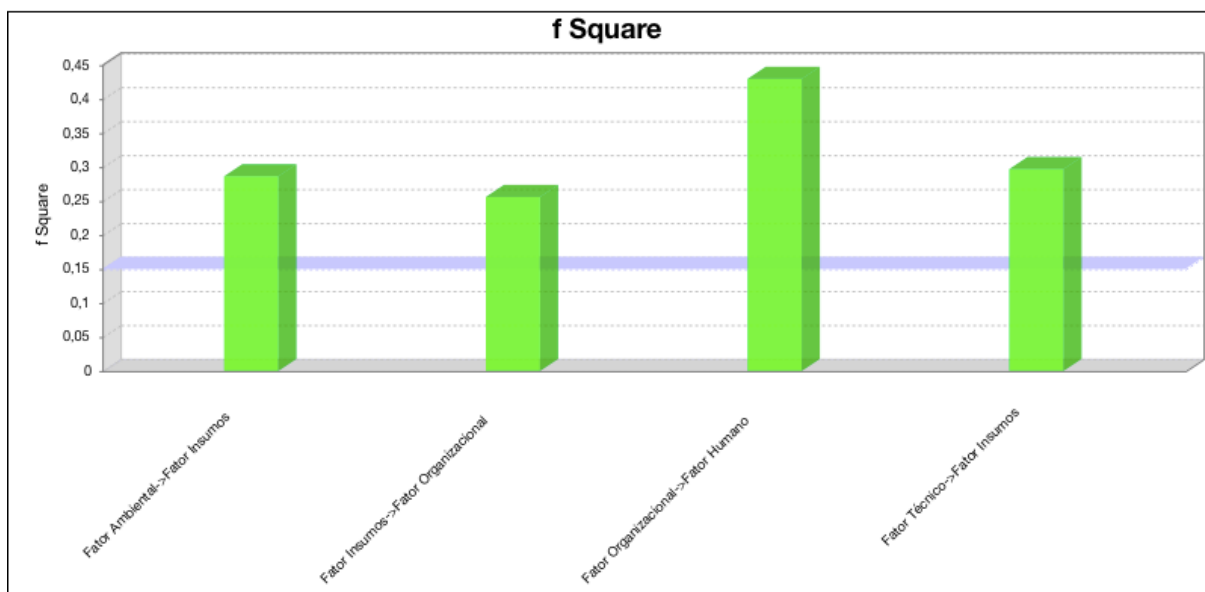


Figura 73 – Resultados do f^2 do modelo estrutural 15.

Verifica na Figura 73 que os resultados dos f^2 das V_i apresentam, conforme escala definida, o status de 'Médio', o efeito do Fator Organizacional no Humano de 'Grande' no modelo 15.

Os resultados para estes indicadores demonstram uma aceitação para um modelo multivariável.

3.2.3.1 Conclusões sobre o estudo dos elementos influentes na confiabilidade de sistemas

A modelagem desenvolvida demonstrou que os elementos determinantes da confiabilidade operacional interagem entre si e o Fator Humano é uma variável formada pelas outras. Especialmente o Fator Organizacional tem impacto direto e significativo no Fator Humano, o que é coerente considerando que o comportamento e as tarefas realizadas pelos humanos dependem das restrições criadas pela organização.

A definição feita para as variáveis do modelo, os elementos determinantes, levaram a uma interdependência entre si, ou seja, não conseguem capturar o fenômeno que se propõem a avaliar sem a representação dos outros fatores. Este é o reflexo do conjunto de afirmativas a serem avaliadas e a forma como foram escritas.

As variáveis Fator Ambiental e Técnico são formadoras das outras variáveis, ou seja, tem impacto significativo nos resultados das outras variáveis exógenas. Os resultados das variáveis endógenas (Ambiental e Técnico) demonstram que foram bem definidas, atendendo aos requisitos de aceitação. Este resultado também é coerente, pois possivelmente é consequência das variáveis serem mais evidentes aos engenheiros de confiabilidade que participaram da pesquisa.

3.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Quanto a MEE da amostragem para as análises de confiabilidade, verificou-se que as estruturas de registro das falhas nos bancos de dados criadas ao longo do processo histórico de informatização da empresa tem influência negativa direta sobre a qualidade da amostra, restringindo um conjunto de dados completo. Dado que os investimentos em atualização dos sistemas computacionais, o cadastramento de registros de falhas e o desenvolvimento de novas estruturas de cadastro e banco de dados representam grandes investimentos de recursos, o caminho para uma solução em obter amostragem com dados completos e corretos não deve ser pela mudança nas estruturas de dados existentes.

Quanto a MEE dos elementos determinantes da confiabilidade de sistemas, do relacionamento entre as variáveis selecionadas para a construção do modelo conceitual, o resultado da percepção da comunidade é que o Fator humano (neste caso especificamente erros de O&M) é uma variável resultante dos outros elementos. Na avaliação concluiu-se que os Fatores Humanos são determinados pela Organização de forma direta e significativa. Como a organização é determinante no desempenho humano, e o momento de interação do humano com a organização, os equipamentos e os sistemas é sempre na realização de uma tarefa, uma proposta para avaliar a confiabilidade é usar a tarefa em execução como centro da análise de causas de falhas. A frequência com que a tarefa é executada é determinante na frequência de falhas do equipamento ou sistema.

Portanto, uma solução para avaliação da probabilidade de erro humano e sua in-

fluência na confiabilidade do sistema ou equipamento é usar métodos de análise de tarefas para identificar os passos que relacionam diretamente erros humanos ao desempenho do equipamento ou sistema.

4 UM NOVO FATOR DE INFLUÊNCIA NA CONFIABILIDADE HUMANA: O USO DE DROGAS PSICOTRÓPICAS

Como visto anteriormente os fatores de influência são importantes para a compreensão do desempenho humano e impactante nos valores das probabilidades de erro humano (*Human Error Probability* (HEP)). Tabelas de probabilidade de erro humano usadas pelos analistas de confiabilidade humana são resultados simplificados dos modelos que são desenvolvidos para ajustar os fatores que influenciam. Alguns dos fatores de influência podem ser mensurados e colocados diretamente com seus valores nas técnicas de HRA, porém a maioria precisa de avaliação qualitativa transformada em valores para serem aplicados nas análises de falhas humanas. Para aplicar os valores das tabelas, uma estrutura metodológica para transformação da escala de avaliação em números precisa ser desenvolvida. A incorporação de um fator de influência ao estudo de uma tarefa deve levar em consideração a capacidade para (i) identificar o mesmo, (ii) criar escala para a magnitude a ser medida, (iii) aplicar na análise de tarefas, e (iv) estabelecer onde entrará como ponderação no método aplicado.

O que será investigado neste capítulo é como desenvolver uma modelagem que traduza, em valores numéricos, a influência de um fator específico na probabilidade de erro humano. Para exemplificar a complexidade um fator em particular foi analisado, que foi o uso de medicamentos com drogas psicotrópicas. Não foram encontradas referências sobre a análise deste fator.

O material apresentado neste capítulo é parte do artigo 'Assessment of Psychotropic Drugs use on tasks of hydro powerplants as a new factor on Human Reliability analysis' de autoria C.L.S. Figueirôa Filho, E.M. Assis, K. K. Santana Gonçalves, Costa Lima, G.A., D. Frias, R.S. Magalhães, desenvolvido ao longo do projeto deste doutorado.

4.1 INTRODUÇÃO

Em um mundo no qual são exigidos altos níveis de desempenho e muitas demandas paralelas no ambiente de trabalho, é cada vez maior o número de pessoas que são submetidas ao uso de drogas psicotrópicas. O uso é sob orientação médica, e as drogas são dosadas em medicamentos recomendados pelos órgãos oficiais de governos. Os medicamentos com drogas psicotrópicas podem afetar o desempenho do executante quando desempenhando tarefas de operação ou de manutenção no ambiente industrial, tarefas estas que geralmente são complexas quanto às demandas físico mental.

Na revisão da literatura não foram encontrados estudos relacionando a avaliação da confiabilidade humana e a quantificação desta prática médica de uso de medicamentos com drogas psicotrópicas como um fator de influência na determinação da performance humana. Verifica-se que a comunidade científica não examinou com mais profundidade

este tema.

Os engenheiros de confiabilidade necessitam de uma estrutura lógica para incluir nas suas análises qualquer fator de influência. Este capítulo tem como objetivo apresentar uma estrutura metodológica para avaliar o risco associado ao uso de drogas psicotrópicas quanto à probabilidade de erro humano em tarefas de operação e manutenção no ambiente industrial. Para tanto, um estudo de caso foi realizado em tarefas de usinas hidrelétricas aplicando métodos de *Human Reliability Assessment* (HRA).

4.2 REVISÃO SOBRE OS EFEITOS DAS DROGAS PSICOTRÓPICAS

As demandas das tarefas muitas vezes impõe alta concentração, atenção, reflexos rápidos, velocidade psicomotora, precisão, coordenação visual espacial e capacidade de decisão. As drogas psicotrópicas podem afetar muitas destas funções humanas, especialmente no início de um tratamento médico (LASSALLE; CHASTANG; NIEDHAMMER, 2015; KIVIMÄKI et al., 2007; DUNNER, 2002b; BARROS; BARROS, 2010; CLAYTON, 1976; RIPOLL; TRIEBWASSER; SIEVER, 2012; DEBATTISTA; SCHATZBERG; C., 2006; BALDWIN et al., 2014). Entretanto, as próprias patologias que estão sendo tratadas podem também comprometer as funções, em particular coordenação psicomotora, cognição e atenção.

Na literatura médica existe bastante informação sobre os efeitos das drogas psicotrópicas sobre o desempenho dos seres humanos em tarefas de rotinas domésticas ou mesmo no uso de veículos. Entretanto, não foi encontrada aplicação em tarefas no ambiente industrial que considerem o uso dessas drogas, assim como métodos para auxiliar nas avaliações de Engenharia de confiabilidade para esse cenário em que o executante de tarefas industriais esteja consumindo drogas psicotrópicas em seus medicamentos diários.

Como não foi encontrado na revisão de literatura sobre os métodos de avaliação da confiabilidade humana, é uma contribuição deste trabalho a inclusão do uso de drogas psicotrópicas como um novo fator que afeta ao desempenho humano. Neste caso, a contribuição significativa está em considerar o uso de drogas psicotrópicas nos ambientes industriais, onde a incidência do uso nas equipes operacionais de campo foi verificada.

O erro humano ocorre quando uma tarefa é realizada. Portanto, a tarefa a ser analisada é fundamental para a abordagem de engenharia de fatores humanos. Na seção 2.2.1.1 deste trabalho, uma revisão da literatura em busca de definição sobre a 'tarefa' e o detalhamento em seus níveis mais baixos, como atividade ou operações. Para tanto, o estudo desenvolvido neste capítulo selecionou algumas tarefas típicas representativas do ambiente em usinas hidrelétricas.

A droga é um químico que produz um efeito farmacológico e portanto causa mudanças funcionais, que podem ser benéficas (os medicinais) ou com efeitos não desejados (os tóxicos).

O medicamento é a preparação de uma combinação de drogas cujo ingrediente ativo é terapêutico. Psicotrópicos pertencem a um grupo de medicamentos que agem no sistema nervoso central (GORENSTEIN et al., 2006a). Os processos de absorção, distribuição, biotransformação, e eliminação são os mesmos de outras drogas ou medicamentos, porém os psicotrópicos fazem parte de uma categoria com efeitos específicos.

O efeito do medicamento depende da sua dosagem, e, em geral, quanto maior a dosagem maior será o efeito. O medicamento nunca é seletivo suficiente para atingir apenas uma mudança de função específica, logo pode haver mais de um efeito. Outra influência é a diferença na maneira como as pessoas distintas reagem a cada medicamento, especialmente no início de cada tratamento médico. O oposto, na condição de uso contínuo do medicamento, a tendência é de que se torne mais seguro quanto à execução das tarefas. As decisões dos médicos devem balancear todos esses processos de forma a obter o melhor resultado para o usuário. As drogas podem afetar diretamente importantes funções para o desempenho de tarefas específicas devido à multiplicidade dos efeitos (DUNNER, 2002b) .

No processo de seleção dos medicamentos para análise quanto à aplicação neste estudo de caso, apenas aqueles que afetam o sistema nervoso central de forma significativa foram considerados (American Psychiatric Association, 2013; DUNNER, 2002b; HIDALGO; SHEEHAN, 2012; STAHL, 2007; ANDREWS et al., 2010). A busca na literatura médica levou a seleção das drogas psicotrópicas existentes nos medicamentos selecionados, e foram identificadas aquelas com maior relevância quanto aos efeitos colaterais que podem interferir direta ou indiretamente nas tarefas industriais, e mais usualmente aplicadas.

4.3 MÉTODO

O arcabouço metodológico proposto inclui um tratamento médico nos métodos de *Human Reliability Assessment* (HRA), e envolve diferentes assuntos: (1) engenharia de fatores humanos, (2) psiquiatria, (3) matemática computacional para estimativa do risco, e (4) confiabilidade humana. Dado que os psiquiatras são os especialistas em prescrição das drogas que afetam o sistema nervoso central, este conhecimento foi considerado relevante para a elaboração da estrutura metodológica. Para integrar as avaliações de confiabilidade humana e ser útil aos engenheiros, a estrutura metodológica deve ter uma concepção matemática e computacional, e estes assuntos compõem a abordagem conforme apresentada na Figura 74.

(1) engenharia de fatores humanos	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação de tarefas típicas de Operação e Manutenção. • Decomposição de cada tarefa em um conjunto de atividades observáveis. • Avaliação da importância de cada atividade em cada tarefa.
(2) psiquiatria	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção das drogas psicotrópicas. • Identificação de um conjunto de funções psíquicas. • Avaliação da relevância de cada função psíquica em cada uma das atividades observáveis. • Avaliação dos efeitos das drogas selecionadas sobre cada uma das funções psíquicas.
(3) matemática computacional para estimativa do risco	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboração de uma escala numérica para representar a relevância do efeito da droga na função psíquica. • Criação de escala numérica para avaliar o impacto da droga na tarefa. • Desenvolvimento de software para simulação de cenários para validação.
(4) confiabilidade humana	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar o processo de ponderação em cada método de avaliação da confiabilidade humana (HRA). • Ajustar fator 'uso de drogas psicotrópicas' no processo de ponderação do método.

Figura 74 – Resumo das áreas de conhecimento e de assuntos envolvidos na elaboração da estrutura metodológica para avaliação do efeito do uso de drogas psicotrópicas no desempenho humano

Verifica-se na Figura 74 o detalhamento em cada uma das áreas temáticas de como o método foi desenvolvido, e cada uma delas será descrita nas seções a seguir.

4.3.1 Engenharia de fatores humanos

Considerando uma lista de atividades padronizadas, qualquer tarefa pode ser decomposta em a atividades. A Figura 75 representa a decomposição de t tarefas em suas a atividades.

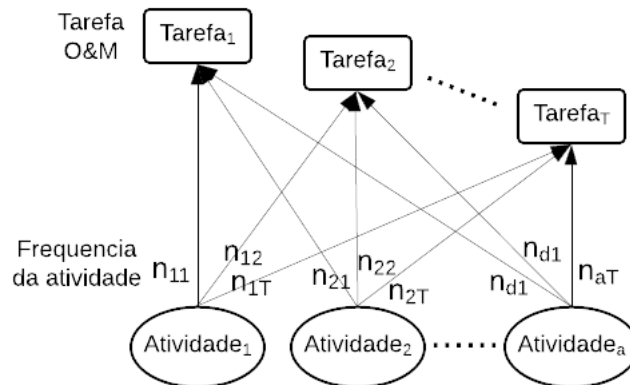


Figura 75 – Decomposição das tarefas em atividades observáveis, n_{at} = número de vezes que a atividade a ocorre na tarefa t .

Identificaram-se tarefas típicas de manutenção e operação em plantas de geração hidrelétrica e as atividades que as compõem. Uma proposta de padronização da nomencla-

tura das atividades identificadas foi elaborada. As atividades especificam processos físicos e mentais e podem ser observadas na remoção de um componente em um equipamento ou em um teste funcional de um elemento eletrônico. Um total de 18 atividades foram selecionadas como mais comuns e representativas.

Como ilustração, a atividade 'diagnóstico' ocorre quando problemas novos, ou seja, sem prévia experiência, ou novas situações em que o ser humano está tomando uma decisão em uma base comparativa, demandando diferentes áreas da mente para resolver o problema. Já a atividade de 'monitoramento' que tem características similares a atividade 'inspeção', possui a peculiaridade de dependência do tempo já que acompanha oscilações de uma variável do sistema, e espera-se não apenas que o executante observe, mas também aja sobre o problema.

A Tabela 27 apresenta as atividades observáveis selecionadas, em exemplo aplicado a uma tarefa típica em usinas hidrelétricas: inspeção de rotina do operador de usina.

Tabela 27 – Número de ocorrências e frequência de cada atividade na tarefa 'inspeção de rotina do operador de usina'.

Atividade	$n_{a,t}$ (quantidade de ocorrências da atividade)	Frequência (%)
Monitoramento	6	7,9
Diagnóstico	22	29,0
Ajuste	0	0
Inspeção/ Verificação	28	36,8
Reparo	0	0
Teste	2	2,6
Amostragem	0	0
Manobras	2	2,6
Comunicação	6	7,9
Planejamento	2	2,6
Remoção	0	0
Instalação	0	0
Montagem	0	0
Contagem	2	2,6
Medição	4	5,4
Manuseio e Transporte	0	0
Serviços administrativos	0	0
Serviços	2	2,6
TOTAL =	76	100

Notam-se na Tabela 27 duas colunas que identificam o número de vezes em que cada uma das atividades observáveis ocorrem na tarefa 'inspeção de rotina do operador', e a última coluna aparece a frequência com que ocorre as atividades observáveis, que é calculada

dividindo pelo total de atividades registradas na tarefa. Como exemplo verificamos que as atividades "inspeção" e "diagnóstico" representam 65,8% das ocorrências.

Para avaliar o impacto de cada atividade na tarefa, um processo de ponderação foi atribuído a cada atividade em cada tarefa. Fundamentado no conceito de risco, calculado pela multiplicação do impacto pela probabilidade, o peso atribuído (w) será a multiplicação da avaliação das consequências da falha na atividade e da frequência com que esta atividade ocorre na tarefa. O impacto das consequências será chamado de relevância, r , e a frequência com que ocorre a atividade será a quantidade de vezes (n) em que ela aparece nas observações das tarefas, calculado conforme:

$$w = r n \quad (4.1)$$

De forma matricial, pode-se condensar em duas matrizes com dimensões $A \times T = 18 \times 29$ que são $r_{A \times T}$ e $n_{A \times T}$, como podemos ver nas Eq. 4.2 e Eq. 4.3:

$$r_{A \times T} = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,T} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,T} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{A,1} & r_{A,2} & \dots & r_{A,T} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

e

$$n_{A \times T} = \begin{pmatrix} n_{1,1} & n_{1,2} & \dots & n_{1,T} \\ n_{2,1} & n_{2,2} & \dots & n_{2,T} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ n_{A,1} & n_{A,2} & \dots & n_{A,T} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Observando a Eq. 4.1 verifica-se que os pesos são obtidos da convolução das matrizes $r_{A \times T}$ e $n_{A \times T}$, portanto, a matriz de pesos é dada por:

$$w_{A \times T} = r_{A \times T} * n_{A \times T}. \quad (4.4)$$

Note que a saída de um nós da tarefa t do par y_t e x_a do nó da atividade a é dado por:

$$y_t = \sum_{a=1}^A w_{a,t} x_a, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T. \quad (4.5)$$

no qual y_t é a variável que quantifica o incremento da contribuição do fator na falha t devido ao aumento da probabilidade de erro humano quando realiza as atividades das tarefas, representadas aqui pelas variáveis de entrada x_a , $a = 1, 2, \dots, A$.

A equação será usada para estabelecer a influência das atividades na realização das tarefas e ser aplicada no estudo de caso desta seção.

4.3.2 Dimensão Psiquiátrica

O impacto da história médica de cada indivíduo também foi considerado nesta pesquisa. Para ser mais preciso, cada caso demanda uma avaliação mais detalhada, considerando aspectos temporais, histórico de dosagem e de consumo de drogas, histórico clínico, histórico físico e testes complementares. Por exemplo, o consumo de drogas sedativas como benzodiazepina, antiepiléticos, e alguns anti-depressivos são descritos nas recomendações do consumo de drogas (informações da bula) como uma condição de risco de acidentes de trabalho. Essas medicações possuem muitos efeitos colaterais que podem interferir direta ou indiretamente nas tarefas. Por outro lado, o uso contínuo e prolongado tende a ser favorável a estabilidade e segurança do usuário quanto a erros (BARROS; BARROS, 2010).

A Tabela 28 apresenta as categorias de drogas psicotrópicas selecionadas, pelos seus princípios ativos e a seus efeitos colaterais.

Tabela 28 – Categorias de drogas psicotrópicas selecionadas.

Categorias de drogas psicotrópicas selecionadas	
1	Anti depressives
2	Tricycle
3	Inibidor Selectivo de serotonina encapsulado
4	Inibidor Serotonina e noradrenalina encapsulado
5	Inibidor Noradrenalina e dopamina encapsulado
6	Inibidor Selectivo noradrenalina encapsulado
7	Antagonista α_2 (disinibidor serotonina e noradrenalina)
8	Antagonista/Inibidor para serotonina encapsulada
9	Inibidor da monoamina oxidase
10	Agonista dos receptores de melatonina
11	Benzodiazepinas de ação menor
12	Benzodiazepinas de ação intermediária
13	Benzodiazepinas de longa ação, Anticonvulsão
14	Antipsychoticos típicos
15	Antipsychoticos não típicos
16	Outros — grupo de drogas frequentemente usadas nas práticas médicas

As categorias apresentadas na Tabela 28 são os exemplos da lista de medicamentos em uso da prática dos psiquiatras no Brasil no momento em que foi realizada a pesquisa. A indústria farmacêutica continuamente desenvolve novas drogas e medicamentos, a lista da Tabela 28 deve ser atualizada conforme os avanços dessa indústria.

Para a proposta em desenvolver uma estrutura metodológica faz-se necessário relacionar as drogas psicotrópicas com as atividades observáveis identificadas. O processamento cognitivo que passa por percepção, memória, atenção, relação com as emoções, e aprendizado se desenvolve em conjunto no sistema neuronal humano. Este sistema é um circuito operacional com funções e processos. As funções e processos mentais são organizados em sistemas relacionados a diferentes zonas cerebrais (CHENIAUX, 2005). Todas as funções psíquicas são importantes para o ser humano desempenhar adequadamente uma tarefa. Essas funções trabalham em uma forma dinâmica e holística, apesar de usualmente serem analisadas pelos pesquisadores e médicos de forma separada. Quando demandada, a mente humana desempenha muitas tarefas relacionadas à recepção, armazenagem e a estruturação da informação em um processo de gerenciamento contínuo da sua capacidade de processamento.

No trabalho desenvolvido nessa pesquisa, após a avaliação das demandas físico e mentais das tarefas industriais, foram identificadas 13 funções psíquicas como as mais relevantes para estas tarefas. A lista dessas funções é apresentada na Tabela 29. Todas as atividades observáveis listadas na Tabela 27 usam estas funções psíquicas.

Tabela 29 – Lista de funções psíquicas mais relevantes.

1	Vigilância
2	Atenção/ concentração
3	Memória
4	Psicomotricidade
5	Pensamento
6	Orientação
7	Conação
8	Pragmatismo
9	Imaginação
10	Linguagem
11	Inteligencia
12	Afeição
13	Senso-percepção

Alguns termos usados na Tabela 29 não são encontrados na literatura consultada sobre a engenharia de fatores humanos, como por exemplo conação e orientação. Foi realizada uma avaliação para estabelecer a relevância de cada função psíquica em cada atividade observável. A Figura 76 mostra a decomposição de cada atividade observável nas funções psíquicas. A avaliação do impacto da função psíquica será feita para cada atividade.

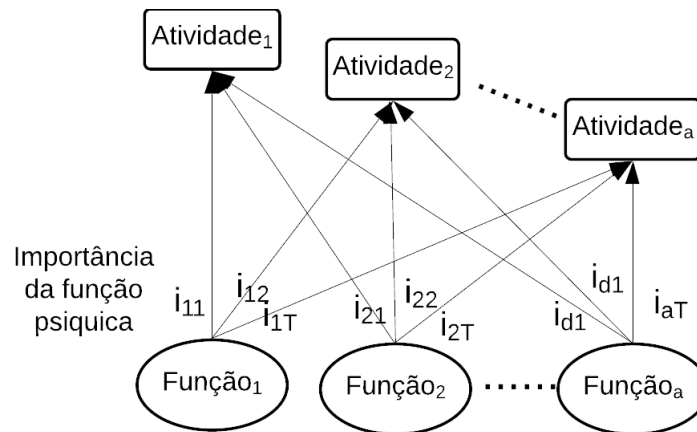


Figura 76 – Relevância das funções psíquicas nas atividades observáveis.

Como pode ser visto as várias funções psíquicas coexistem em várias atividades observáveis de uma mesma tarefa, atividades que podem ser realizadas ao mesmo tempo muitas das vezes. A relevância r_{fa} é o impacto da função psíquica f na atividade a .

A Tabela 30 apresenta exemplos de atividades observáveis associadas às funções psíquicas.

Tabela 30 – Ilustração com exemplos de atividades observáveis associadas às funções psíquicas.

Atividade	Funções Psíquicas
Monitoramento	vigilância, atenção/ concentração, senso-percepção, memória, pensamento, conação, pragmatismo
Amostragem	vigilância, atenção/ concentração, senso-percepção, memória, conação, pragmatismo, memória, psicomotricidade, orientação

Para avaliar a relevância da função psíquica na atividade observável uma escala linguística foi criada. A Tabela 31 apresenta um exemplo para a atividade "monitoramento". A escala estabelece 4 níveis de relevância: (1) forte relevância-S, (2) moderada relevância-M, (3) relevância moderada em alguns casos ou Rara-R (4) relevância fraca - W.

Tabela 31 – Exemplo de relevância das funções psíquicas para a atividade de Monitoramento.

Função Psíquica	Relevância na atividade Monitoramento
Vigilância	S
Atenção	S
Senso-percepção	S
Memória	S
Linguagem	R
Pensamento	M
Inteligência	R
Imaginação	R
Conação	M
Pragmatismo	M
Psicomotricidade e equilíbrio	R
Afeição	W
Orientação	W

Como a atividade monitoramento demanda atenção verifica-se na Tabela 31 que aparece como uma função psíquica com forte relevância, assim como, o uso da função Linguagem na atividade é pouco significativo e na escala aparece como relevante em alguns casos.

Por fim, verifica-se que cada droga psicotrópica tem efeito sobre as diversas funções psíquicas, apresentado de forma diagramática na Figura 77.

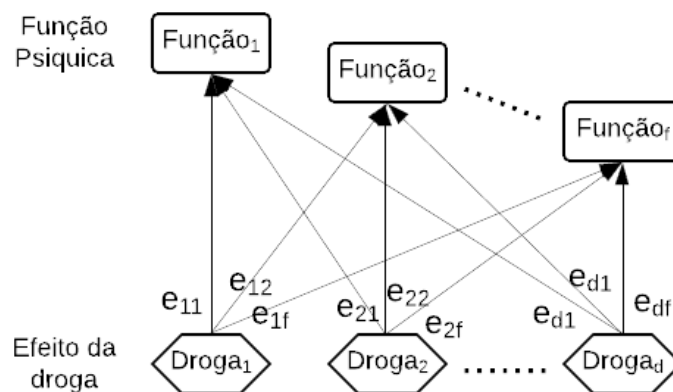


Figura 77 – Efeito das drogas psicotrópicas nas funções psíquicas. e_{df} = efeito das drogas psicotrópicas d na função psíquica f

A Figura 77 visa express de forma esquemática que uma droga psicotrópica tem vários efeitos colaterais que vão ser apresentados na observação das funções psíquicas. Um mesmo medicamento pode ter várias drogas psicotrópicas na sua formulação, portanto efeitos de várias drogas sobre a mesma função.

Uma outra escala qualitativa foi desenvolvida para mensurar o efeito das drogas nas funções psíquicas, apresentada na Tabela 32. Essa escala representa os efeitos mais comumente encontrados e as reações adversas nas funções psíquicas.

Tabela 32 – Escala qualitativa de símbolos para avaliação dos efeitos das drogas nas funções psíquicas.

Simbologia	Descrição
(++)	Relativamente comum ou forte,
(+)	Pode ocorrer ou moderada
(-)	Rara ou fraca
(X)	Baixa

A escolha dos níveis apresentados na Tabela 32, assim como a simbologia adotada, foi desenvolvida em conjunto com os psiquiatras participantes desta pesquisa. As drogas, por atuarem de forma combinada, tornam seus efeitos difíceis de serem mensurados de forma exclusiva, por isso a escolha de uma escala qualitativa linguística. A escala construída dessa forma, permite a cada psiquiatra uma faixa de escolha sobre a sua percepção do efeito, usando o conhecimento obtido da experiência dos mesmos.

Um exemplo do efeito de uma categoria de droga psicotrópica nas funções psíquicas quando desempenhando atividade monitoramento é apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 – Exemplo da avaliação da relevância das funções psíquicas na atividade de monitoramento e dos efeitos de uma categoria de drogas psicotrópicas nas funções .

Função Psíquica	Relevância da Função para a atividade	Anti depressivos Tricíclicos			
		A	C	I	N
Vigilância	S	++	++	+	+
Atenção	S	++	++	+	+
Senso percepção	S	++	++	++	+
Memoria	S	+	++	++	+
Linguagem	R	X	X	X	X
Pensamento	M	X	X	X	X
Inteligência	R	-	-	-	-
Imaginação	R	-	-	-	-
Conação	M	++	++	+	-
Pragmatismo	M	++	++	+	-
Psicomotricidade e equilíbrio	R	++	++	++	+
Afetividade	W	-	-	-	-
Orientação	W	-	-	-	-

Legend: A = Amitriptilina C= Clomipramina I=Imipramina N=Nortriptilina

A Tabela 33 estabelece as complexas relações dentre as drogas até as atividades observáveis, independentemente da tarefa que está sendo realizada. Todas as categorias de

drogas psicotrópicas apresentadas na Tabela 28 foram detalhadas conforme exemplificado na Tabela 33 para o caso da Amitriptilina. A Tabela 33 foi desenvolvida pelo conhecimento do grupo composto por experientes economistas e psiquiatras, não sendo encontrado na literatura revisada nada similar. Os efeitos das drogas e a relevância para a atividade foram determinados pelo, mesmo considerando a larga experiência nas áreas específicas, as avaliações destas relações podem mudar caso uma nova amostra de profissionais seja trabalhada. Portanto, como este trabalho é uma modelagem nova, trabalhos futuros podem vir a desenvolver análises mais aprofundadas.

A Figura 78 apresenta a rede criada pela combinação das dimensões econômica e psiquiátrica, estabelecendo um diagrama de influência entre os elementos dessa rede.

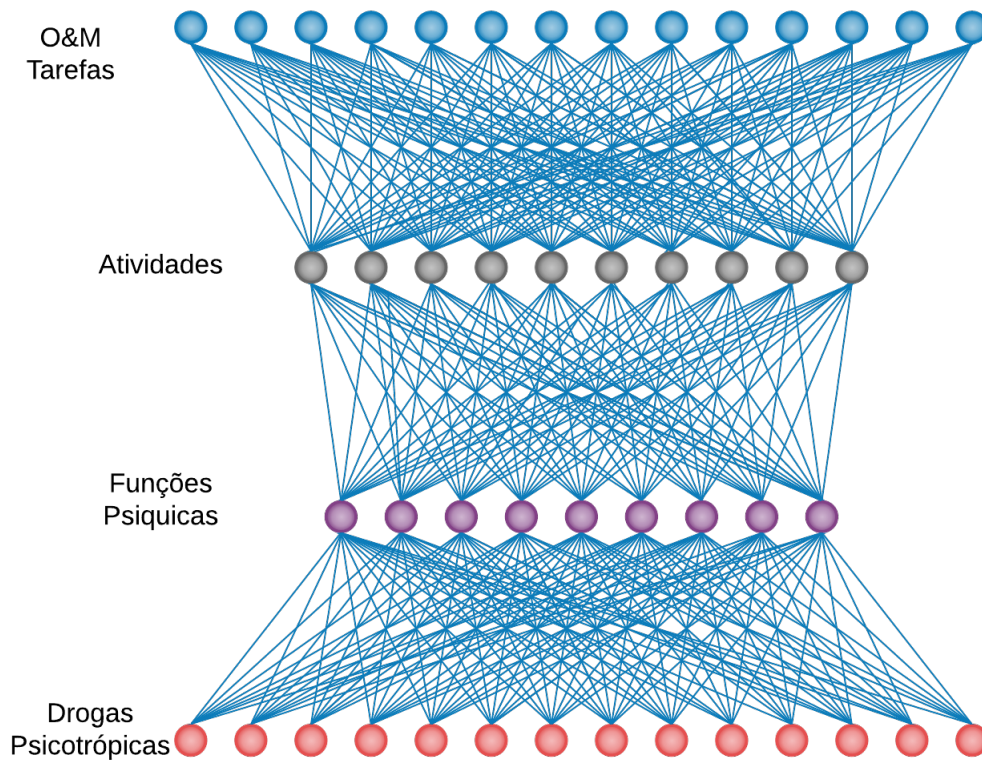


Figura 78 – Rede de influência entre drogas psicotrópicas x funções psíquicas x ações observáveis x tarefas

O resumo proposto na Figura 78 demonstra o efeito do uso das drogas psicotrópicas nas tarefas industriais, passando por dois elementos no processo de interpretação de todo fenômeno que são as funções psíquicas e as atividades observáveis. As funções e as atividades são elementos básicos para compreender o complexo relacionamento entre os elementos dessa rede de influência.

4.3.3 Dimensão Matemática e Computacional

A estrutura metodológica proposta precisa ser capaz de avaliar o risco do uso de drogas psicotrópicas quanto à ocorrência de erros humanos nas tarefas de operação e manutenção. Para tanto, as escalas qualitativas até então apresentadas precisam ser transformadas em um processo de ponderação por pesos para estabelecer um valor para o risco.

As Tabelas 32 e 31 atribuíram referências de escala para a relevância da função psíquica na atividade ($r_{f,a}$) e para o efeito das drogas na função psíquica ($e_{d,f}$). Essas escalas foram transformadas em valores numéricos apresentados nas Tabelas 34 e 35. Na Tabela 34 os níveis da escala dobram de valor conforme vão subindo nessa escala. Já na Tabela 35 os valores atribuídos sobem de maneira proporcional a uma constante somada, de valor 0,33.

Tabela 34 – Valores atribuídos na escala qualitativa da relevância das funções psíquicas nas ações.

Escala qualitativa da relevância das funções psíquicas nas ações (r)		Valor atribuído
Forte	(S)	2,00
Moderado	(M)	1,00
Pouco ou raro	(R)	0,50
Fraco	(W)	0,25

Tabela 35 – Valores atribuídos na escala qualitativa do efeito das drogas nas funções psíquicas.

Efeito da droga na função psíquica (e)	Valor atribuído
(++)	1,00
(+)	0,67
(-)	0,33
(X)	0,00

A Tabela 35 apresenta um gradiente menor que o da Tabela 34 de forma a representar a percepção dos psiquiatras que a avaliaram. Ou seja, os psiquiatras confiavam mais nos resultados referentes ao efeito das drogas nas funções psíquicas, domínio de conhecimento desses profissionais, do que na avaliação da relevância da função psíquica na atividade observável, um conceito novo.

Para representar o impacto da droga psicotrópica no risco do ser humano falhar na execução de uma tarefa foi criado um indicador chamado de Contribuição da Droga ao Risco (*Drug Component to Risk - DCR_{t,d}*). O peso dado a consequência da falha na tarefa,

referente a Eq.(4.1), combinado ao efeito das drogas na função psíquica estabelece um vetor calculado pela Eq.(4.6).

$$DCR_{t,d} = \sum_{a=1}^A n_{a,t} r_{a,t} \left(\sum_{f=1}^F r_{f,a} e_{d,f} \right), \quad (4.6)$$

na qual A é o número de atividades, F é o número de funções psíquicas, $n_{a,t}$ é a frequência da atividade a na tarefa t , e $r_{a,t}$ é a relevância da função f na atividade a , $e_{d,f}$ o efeito da droga d na função f . A formulação apresentada segue a lógica aceita nas avaliações de risco nas quais o valor numérico atribuído ao risco será a multiplicação o número de ocorrências pelo severidade dos efeitos. A relação linear estabelecida nesta formulação apenas representa a primeira tentativa de modelar matematicamente, já que não existem dados para ser estimado um modelo matemático, pois essa é a estrutura inicial para levantar dados de campo.

O modelo completo ocorrerá quando o trabalhador usar várias drogas controladas devido a conhecida interação entre as drogas a qual pode reduzir ou aumentar o efeito nas diferentes funções psíquicas (DUNNER, 2002a; GORENSTEIN et al., 2006b). A contribuição de cada droga para o risco deve ser adicionada incluindo um termo na equação referente a esta interação entre as drogas, como o exemplo da Eq.(4.7).

$$DCR_{t,[d_1,d_2,\dots,d_m]} = \sum_{a=1}^A n_{a,t} r_{a,t} \left(\sum_{d=d_1}^{d_m} \partial_d \right) \left(\sum_{f=1}^F r_{f,a} e_{d,f} I_{d,f} \right), \quad (4.7)$$

na qual ∂_d é um fator de dosagem da droga dado como uma taxa das doses mais recentes com referencia a dose nominal ou habitual, $I_{d,f}$ é o coeficiente da interação sobre o efeito de cada droga na função f sobre todas as drogas simultaneamente tomadas pelo trabalhador.

Apesar do efeito da dosagem e das interações entre as drogas ser reconhecido pelos psiquiatras, não foi encontrada na literatura, e nas entrevistas com os especialistas consultados, uma formulação matemática que pudesse representar este complexo processo da interação das drogas e do efeito da dosagem. Por esse motivo a Eq.(4.7) foi desconsiderada.

O termo relevância relativa da atividade para a tarefa ($r_{a,f}$) demonstrou ser muito difícil em obter uma definição do seu valor. O oposto ocorreu para o termo frequência da atividade, que demonstrou ser bastante útil e uma boa simplificação do processo de análise de tarefa. Assim, o termo $r_{a,f}$ foi considerado igual a 1 para todas as atividades e a Eq.(4.6) passou a ser calculada como:

$$DCR_{t,d} = \sum_{a=1}^A n_{a,t} \left(\sum_{f=1}^F r_{f,a} e_{d,f} \right). \quad (4.8)$$

Considerando como exemplo para avaliar o método a situação usando apenas uma droga e o efeito em apenas uma tarefa observável, o termo $n_{a,t}$ torna-se igual a 1 e o índice, que agora será chamado de *Drug Effect to an Activity* (DEA), será calculado como:

$$DEA_{a,d} = \sum_{f=1}^F r_{f,a} e_{d,f} \quad (4.9)$$

Um exemplo da forma de calcular esse índice é apresentado na Tabela 4.3.3 para a droga amitriptilina agindo sobre a atividade monitoramento.

Tabela 36 – Exemplo de valores atribuídos para obter o impacto do efeito da droga na atividade. A categoria de medicamento é a Anti-depressivos Tricíclicos. A droga é a Amitriptilina, e a atividade é Monitoramento.

Monitoramento	Relevância da Função		Efeito da droga		$r_{f,a}e_{d,f}$
	Nível	$r_{f,a}$	Nível	$e_{d,f}$	
Vigilância	S	2	X	0,33	0,66
Atenção	S	2	++	1	2,00
Senso-percepção	S	2	+	0,67	1,34
Memória	S	2	+	0,67	1,34
Linguagem	W	0,25	+	0,67	0,16
Pensamento	W	0,25	+	0,67	0,16
Inteligência	W	0,25	+	0,67	0,16
Imaginação	M	1	+	0,67	0,67
Conação	M	1	+	0,67	0,67
Pragmatismo	M	1	++	1	1,00
Psicomotricidade e equilíbrio	F	0,5	++	1	0,50
Afetividade	F	0,5	++	1	0,50
Orientação	S	2	++	1	2,00
Efeito da droga na atividade (Total)					11,2

Nota-se na Tabela 4.3.3 que as colunas relevância da função e efeito da droga tem separadamente duas informações, a primeira é a escala qualitativa e a segunda o valor atribuído para essa escala. A última coluna da Tabela 4.3.3 é o produto dos valores das duas colunas anteriores. O valor encontrado para o índice de DEA será o somatório da última coluna, que nesse caso é igual a 11,2 .

A equipe da pesquisa desenvolveu para todas as tarefas observáveis sob a ação de todas as drogas psicotrópicas listadas na pesquisa estas relações, elaborando várias tabelas como a Tabela 4.3.3.

O resultado do índice DEA é um valor absoluto, e para o uso relacionado ao risco é conveniente a normalização da variável para comparar os resultados obtidos. Para tanto, calcula-se o valor máximo possível para esse índice, que ocorre quando todas as funções psíquicas ($F = 13$) são de forte relevância para a atividade, ou seja, todas de valor 2, e o efeito das drogas psicotrópicas são iguais para todas funções, ou seja, de valor igual a

1. Assim, o valor máximo obtido é 26 ($=13 \times 2,0 \times 1,0$). O valor normalizado é obtido dividindo o valor calculado para uma única droga e dividido pelo valor máximo possível. Este novo indicador é chamado *RMV - Relative to Maximum Value*, e é apresentado a sua forma de cálculo como:

$$RMV = \frac{DEA}{26} \quad (4.10)$$

Para o valor encontrado na Tabela 4.3.3 para o efeito da droga amitriptilina sobre atividade monitoramento, o resultado do índice *RMV* é 0,43. Este resultado pode ser usado na avaliação da performance humana na atividade monitoramento.

O índice *DEA* e o *RMV* são para uma atividade sob efeito de um droga apenas, mas o objetivo é encontrar um valor para a tarefa completa composta de várias atividades observáveis. Considerando o uso da droga amitriptilina e a tarefa inspeção de rotina do operador, foi calculado o valor do indicador DCR, apresentado na Eq.(4.8), e usando os resultados apresentados na Tabela 27. O valor obtido foi 20,16.

A simplificação apresentada na Eq.(4.8) sobre a relevância relativa da atividade na tarefa ($r_{a,f}$) foi a decisão mais difícil porque parecia ser um diferencial inovador nessa abordagem proposta. Entretanto, foi muito difícil conseguir um consenso sobre o impacto em cada atividade, e uma solução generalizada não seria mais possível, dado que uma nova avaliação seria requerida para cada nova tarefa analisada, fugindo da proposta inicial desse trabalho.

4.3.4 Confiabilidade Humana

Como o objetivo deste trabalho é criar uma estrutura para os engenheiros de confiabilidade avaliarem o efeito nas confiabilidade humana, buscou-se na indústria de geração de energia nuclear referências, já que as plantas possuem tarefas similares as das plantas de usinas hidrelétricas. Como os métodos mais usados para avaliação da confiabilidade humana ainda são o da indústria nuclear, foram selecionados como referência os métodos THERP, SLIM, HEART. Esses métodos usam o conceito de fator de influência para ajustar as condições do contexto identificadas. A qualidade da solução proposta será avaliada na aplicação desses três métodos.

4.4 ESTUDO DE CASO

A metodologia foi aplicada a usinas hidrelétricas, que é um sistema composto por turbinas, geradores, e equipamentos associados como transformadores, disjuntores, sistema de refrigeração, válvulas, etc. Um total de 8 hidrelétricas tiveram suas plantas inspecionadas, e as equipes de operação e manutenção foram entrevistadas sobre o trabalho que realizavam.

Ergonomistas e psicólogos desenvolveram todo o processo de entrevista e avaliação do ambiente. Em todas essas entrevistas, as pessoas foram conduzidas a expressar qualquer tipo de condição estressante e que poderiam enviar uma mensagem privada ao psicólogo se desejassem. Algumas pessoas declararam estarem usando medicamentos que possuem drogas psicotrópicas. No grupo dos usuários desses medicamentos, todos tinham idade acima de 40 anos.

Aproximadamente 450 tarefas de manutenção e operação foram identificadas nas atividades das usinas. Uma avaliação de risco foi desenvolvida considerando o impacto da falha e a frequência com que ocorreram. Do total de tarefas, 21 foram selecionadas por serem consideradas críticas e analisadas passo a passo. Das tarefas selecionadas como críticas, 10 foram simuladas no software desenvolvido pela equipe, chamado SARO (referência). Neste estudo de caso serão usadas apenas duas das tarefas críticas, e são tarefas de operadores de usina. A primeira tarefa é a partida da unidade geradora após grande manutenção, e a segunda é a tarefa de inspeção de rotina dos equipamentos da usina.

A inspeção de rotina do operador é uma tarefa familiar, ou seja realizada de forma automática, com baixa complexidade para a maioria dos operadores, especialmente com mais experiência. A atividade de inspeção possui um momento para definir se ocorreu ou não uma falha, este momento de decisão depende do cenário e da percepção criada na mente do Inspetor, nesse caso o operador de usina. A tarefa é simples, entretanto, existem muitos equipamentos que devem ser inspecionados. Se o número de equipamentos a serem inspecionados crescer, o número de atividades de inspeção também cresce, e a tarefa torna-se complexa. As inspeções dos equipamentos incluem até 35 diferentes equipamentos no mesmo turno de trabalho. Em cada equipamento até 8 pontos devem ser inspecionados, dessa forma, a tarefa pode ser composta por um total de 380 pontos de inspeção. Alguns aspectos ergonômicos podem aumentar a probabilidade do ser humano falhar, como a interface do equipamento que pode dificultar o acesso a alguns locais que devem ser verificados.

Conforme proposto inicialmente a solução foi aplicada a três técnicas de avaliação da confiabilidade humana. Inicialmente as técnicas foram aplicadas a tarefa de inspeção de rotina do operador sem considerar o efeito de drogas psicotrópicas como um fator de influência na performance. Em um segundo momento, foi realizada a aplicação incluindo o fator a influência das drogas.

4.4.1 Resultados

Na técnica SLIM, que usa uma rede de fatores de influência ponderados, foram considerados 8 fatores de influência principais. São eles: layout da área de trabalho, pressão do tempo, iluminação, experiência do Inspetor, interrupções do ambiente de trabalho,

acessibilidade aos pontos de expressão, complexidade da tarefa, suporte da organização para a tomada de decisão. O valor encontrado para toda a tarefa usando o software da HRA - Human Reliability Associates foi de uma probabilidade de erro humano de 0,4.

A técnica HEART possui concepção similar a SLIM, mas possui uma estrutura processual simplificada. O valor do erro humano selecionado na tabela da técnica para inspeção visual de um único ponto de inspeção era 0,03. Entretanto, a tarefa é de vários pontos de inspeção. Para realizar a avaliação através de toda a tarefa novos cenários foram considerados. As atividades inspeção, diagnóstico e ação foram desempenhadas por 4 horas de serviço, tempo esperado de realização nas plantas analisadas. Este novo cenário foi simulado em um script desenvolvido na linguagem Python pelos autores, e o resultado encontrado da probabilidade de erro humano foi de 0,6.

Na THERP foi considerado nos ramos da árvore de eventos uma sequência de três atividades para cada ponto de expressão (inspeção, diagnóstico, ação). Na tabela do método a tarefa de inspeção visual tem uma probabilidade de erro humano estabelecida de 0,0002. Esse valor foi usado em todos os ramos da árvore de eventos considerando a mesma sequência de três atividades. O resultado obtido neste caso foi de uma probabilidade de erro humano para toda a tarefa de 0,38.

O próximo passo foi incluir o fator de influência com presença de uma droga psicotrópica. Como exemplo de uso até a agora foi o da Amytril amitriptilina, este também foi usado como referência para esta aplicação. Considerando que o operador realizando a tarefa estava sobre o efeito dessa droga, o seu índice RMV para cada atividade identificada nesta tarefa foi multiplicado pelo número de ocorrências das atividades (exemplo: monitoramento aparecem seis vezes em um total de 78 atividades, uma frequência relativa de 0,077). O resultado desses produtos para todas as atividades envolvidas foram aplicadas nos resultados de cada uma das técnicas, e são apresentados na Tabela 37, comparados aos resultados sem a inclusão dos efeitos da droga.

Tabela 37 – Comparativo do uso da Amitriptilina e não uso no valor da HEP para a tarefa 'inspeção de rotina' do operador.

HRA	HEP	HEP
Método	Sem efeito da droga	Uso da droga
THERP	0,40	0,54
SLIM	0,38	0,51
HEART	0,60	0,69

Verifica-se na Tabela 37 que os valores das probabilidades de erro após a inclusão do efeito da droga Amitriptilina foram maiores, variando de 15% para o maior valor obtido inicialmente que foi no método HEART, a 35% para o menor valor que foi para o método THERP. A introdução da estrutura metodológica para o fator 'uso de drogas psicotrópicas'

conseguiu mudar sensivelmente o resultado final.

4.4.2 Discussão

Existem outros medicamentos que poderiam ser considerados no levantamento inicial desse trabalho, mas a implementação computacional subsequente utilizando mais medicamentos para avaliar o risco se tornaria muito complexa e o ganho em torno desse esforço não seria tão significativo. Dado que a indústria farmacêutica continuamente desenvolve novos medicamentos, com novas drogas, uma análise seria impraticável para cobrir todos os medicamentos.

O analista deve estar atento que não é simplesmente o uso de drogas que é responsável por muitos sintomas. Deve-se também considerar a influência de múltiplos fatores incluindo suscetibilidades individuais, as doses usadas, o uso prolongado das drogas, o impacto da patologia nas funções psíquicas a combinação de terapias durante o tratamento, a presença de outras doenças e o desenvolvimento de tolerância a própria droga.

Palavras significam coisas diferentes para pessoas diferentes, conseqüentemente existe incerteza associada com qualquer palavra usada, especialmente quando estamos construindo uma escala linguística. Existem quatro diferentes universos de discurso na proposta desenvolvida nesta seção originados das diversas áreas do conhecimento envolvidas, assim os resultados finais têm a composição das incertezas de cada um desses universos de discurso. O processo depende do julgamento dos especialistas, então a imprecisão linguística é parte dessas causas das incertezas. Adicionalmente, o trabalho de psiquiatria não é uma ciência exata, e é baseado na experiência de cada droga específica e na análise profunda de cada situação. Como o objetivo neste trabalho é apresentar um instrumento para iniciar a medição de algo novo na avaliação da confiabilidade humana e demonstrar o esforço para desenvolver um modelo como este, a quantificação da Incerteza associada não foi elaborada neste momento. Entretanto, o autor tem consciência que em uma aplicação usando os valores obtidos dos resultados desta estrutura metodológica devem ter associados uma avaliação de incerteza.

4.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A estrutura metodológica desenvolvida é uma contribuição significativa deste trabalho, pois é genérica e pode ser aplicada em tarefas em qualquer setor econômico. Devido a concepção das atividades observáveis padronizadas a aplicação não depende da tarefa, mas da frequência em que as atividades aparecem na tarefa. Os fatores de influência impactam nas atividades e são avaliados apenas uma vez. Portanto, a análise de tarefas é simplificada, já que o trabalho é de contagem das atividades padronizadas que podem ser observadas sem interpretação do analista.

Como visto em capítulos anteriores, cada técnica de *Human Reliability Assessment* (HRA) tem suas próprias abordagens para considerar o contexto na forma de fatores de influência na performance humana. Entretanto, a proposta apresentada foi aplicada a técnicas conhecidas de HRA e provou ser flexível na inclusão dos efeitos do uso de drogas psicotrópicas no erro humano.

No caso específico do fator de uso das drogas psicotrópicas a inclusão de um profissional especialista, um psiquiatra, faz-se necessário caso seja aplicado a pessoas específicas, pois o histórico de uso de drogas e do tratamento envolvido deve ser melhor detalhado.

Uma contribuição esperada deste trabalho é reconhecer a necessidade de dados para construir uma base de conhecimento que suporte a avaliação das drogas psicotrópicas na confiabilidade humana. A experiência na aplicação do instrumento desenvolvido suportará as análises de risco e o trabalho dos engenheiros de confiabilidade em seu processo de tomada de decisão.

O estudo de caso sobre o uso de medicamentos tem como objetivo demonstrar a complexidade para incluir um novo fator nas avaliações de falhas humanas. Para cada novo fator incluído, um novo modelo para tratar a influência ao desempenho humano será desenvolvido. Reunir todos os modelos para que representem melhor o fenômeno real pode ter consequência contrária, pois a influência do resultado de um fator pode reduzir, ou até mesmo anular, o do resultado de outro.

5 MONITORAMENTO PREDITIVO DE FALHAS HUMANAS E A SISTEMATIZAÇÃO DA COLETA DOS DADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Na aplicação de métodos para a predição da confiabilidade de um sistema, a obtenção de dados completos (Capítulo 2) é complexa, dificultando a análise da falha desses sistemas. Os dados necessários são provenientes de uma composição dos seguintes elementos (i) registros das falhas do sistema físico (equipamento ou processo tecnológico), (ii) registro das falhas humanas envolvidas (desvio de um padrão esperado de desempenho), e (iii) conhecimento do cenário de interação humano-máquina (Tarefa e Fatos de Influência no Desempenho). Os dados e o processo de coleta das falhas no sistema físico usa os registros dos bancos de dados de operação e manutenção, ou dados de experimentos controlados em laboratório. Para os outros dois elementos, o ser humano e o seu contexto de interação, são adotados os procedimentos de coleta já apresentados na subseção 2.2.5. Cada método de avaliação da confiabilidade humana (HRA - *Human Reliability Assessment*) determina o seu próprio método de inserção da informação. Alguns dos métodos de *Human Reliability Assessment* (HRA) disponibilizam valores nominais das probabilidade de erro humano (HEP - *Human Error Probability*) que precisam ser ajustados com o terceiro elemento dos dados, a interação humano-máquina no cenário real da execução da tarefa.

Para o caso das falhas humanas, a caracterização do que é um desvio de processo na execução de uma atividade, a identificação dos fatores contextuais, a variabilidade aos fatores e sua caracterização, torna a coleta das informações um processo de difícil aplicação e compreensão.

Para obter dados completos, estabelecer uma estrutura para sistematizar a coleta de dados pode permitir o monitoramento da confiabilidade do sistema. Neste Capítulo serão discutidas as razões encontradas para obter as *Human Error Probability* (HEP) e proposto um processo para sistematização do monitoramento preditivo das falhas humanas. A estrutura do processo será explicada com um exemplo real.

5.2 ABORDAGEM PROPOSTA PARA MONITORAMENTO PREDITIVO DE FALHAS HUMANAS EM CAMPO

Um primeiro passo para a sistematização da coleta de falhas humanas é estabelecer um ponto de verificação na tarefa que tenha parâmetros já monitorados, e, posteriormente, critérios para o que será considerado falha humana ou falha do sistema. Para tanto volta-se aos fundamentos dos métodos de fatores humanos (*Human Factors Methods* (HFM)) que tem foco na análise da tarefa.

Nessa proposta decidiu-se por realizar o detalhamento da tarefa partindo de um

procedimento escrito já em uso. A meta é obter dados de falhas humanas e com o uso do método desenvolver um monitoramento preditivo destas falhas. A Figura 79 apresenta a proposta para o monitoramento preditivo de falhas humanas. O fluxograma apresentado na Figura 79 aplica-se a qualquer contexto industrial, que é geralmente composto de processos tecnológicos de produção com organização de seus equipamentos, controles para monitorar o resultado do produto em cada etapa, sistemas de automação que agem em conjunto com os controles, e os seres humanos que interagem com estes sistemas.

A descrição de cada uma das etapas é apresentada a seguir.

1. **Identificação da tarefa** - nesta etapa a tarefa será descrita estabelecendo quais passos estão incluídos nela e os que não participam da tarefa (exemplo: os passos referentes a preparação de itens de segurança antes da execução não serão incluídos). Devem ser identificados todos os elementos principais do sistema. Faz-se necessário definir as fronteiras físicas, ou seja, em que ponto do sistema inicia a análise e o que será incluído (exemplo: o sistema de combate a incêndio não será incluído na tarefa em análise). A identificação das interfaces entre os elementos deve ser realizada também, e informando de forma sucinta as principais funções dos elementos (exemplo: a válvula de controle a montante da bomba mantém a pressão dentro do *set-point*).
2. **Levantamento dos sistemas de automação e monitoramento** - nesta etapa são detalhados os sistemas de automação e de monitoramento usados pelas equipes de operação e manutenção são detalhados. Identificam-se os elementos e as variáveis envolvidas. Apenas os sistemas relacionados com a tarefa em análise são detalhados.
3. **Identificação dos parâmetros acompanhados pela equipe de execução da tarefa** - esta etapa identifica variáveis do processo ou dos equipamentos que são usadas como suporte para a execução da tarefa. Alguns desses parâmetros podem estar associados aos sistemas de automação e monitoramento, mas são usados como guia pelo executante. Não é necessário ainda neste ponto identificar os valores dos parâmetros, já que eles são dependentes dos cenários escolhidos.
4. **Análise do procedimento escrito estabelecido** - A análise da tarefa será desenvolvida sobre um procedimento já estabelecido. O processo de conhecer o sistema, de verificação da tarefa real e as entrevistas são realizadas para identificação de todos os agentes e do momento em que participam. Entretanto, a referência continuará sendo o procedimento estabelecido. As causas que levam o executante a mudar a forma de realizar o trabalho não serão levantadas nesta etapa.
5. **Aplicação de um *Human Factors Methods* (HFM) à tarefa** - como visto no Capítulo 3, muitos métodos desenvolvidos para levantamento de fatores humanos na tarefa são usados pela engenharia de fatores humanos. O objetivo é detalhar a

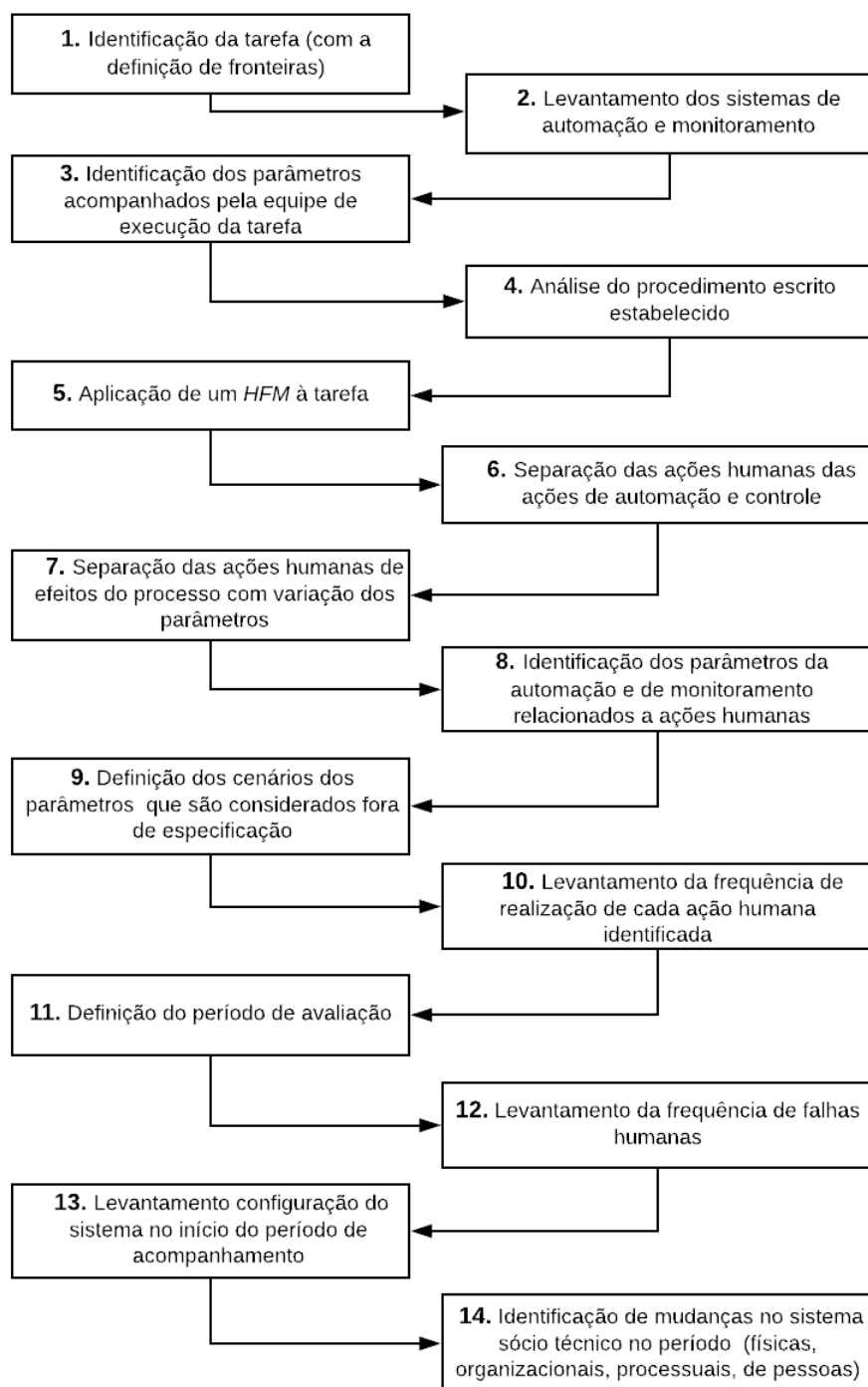


Figura 79 – Sequência para sistematização de um monitoramento preditivo dos dados de falha humana.

tarefa em suas etapas, passos e ações, o suficiente para conseguir separar as ações humanas e seus padrões de desempenho esperados, assim como as interfaces com todo o sistema sóciotécnico.

6. **Separação das ações humanas das ações de automação e controle** - seguindo a tarefa, são levantados os momentos em que ocorrem as ações humanas e aqueles quando ocorrem as ações da automação. As ações podem ocorrer concomitantemente entre humanos e automação, entre humanos e humanos, e entre elementos da automação em diferentes partes do sistema. Todas devem ser devidamente identificadas e listadas nos instantes em que devem ocorrer segundo o previsto.
7. **Separação das ações humanas de efeitos do processo que levem a variação dos parâmetros** - oscilações do processo devido a qualidade da matéria prima, de reações do processo ou de seus insumos (energia elétrica, vapor, ar comprimido, etc) devem ser separadas da participação exclusivamente humana. Pode ocorrer a necessidade de correções dos executantes para estabilizar estas oscilações, porém pretende-se neste ponto separar o que se espera do desempenho humano das outras causas.
8. **Identificação dos parâmetros da automação do monitoramento relacionados a ações humanas** - podem existir muitas variáveis de processo, e nesta etapa identificam-se aquelas que podem ser usadas como parâmetros e que já estão sendo acompanhados pelos sistemas de automação ou de monitoramento e estão relacionadas às ações humanas da tarefa analisada.
9. **Definição dos cenários dos parâmetros que são considerados fora de especificação** - com os parâmetros das ações humanas já identificados, os valores considerados fora do padrão estabelecido devem ser determinados. Situações contextuais podem mudar os valores dos parâmetros em cada cenário, mas enquanto não há experiência no monitoramento das probabilidades de falhas humanas, os valores previstos pelo procedimento serão as referências.
10. **Levantamento da frequência de realização de cada ação humana identificada** - Identificar as ações humanas para obter a probabilidade de falhas conforme a Subseção 2.2.5.1, Eq. 2.19, faz-se necessário conhecer o N - número de vezes que ocorre a etapa, o passo ou a ação. É preciso conhecer a frequência de realização da tarefa na empresa e multiplicar pelo número de vezes que ocorre a ação humana específica na tarefa.
11. **Definição do período de avaliação** - este período é função dos dados disponíveis, mas deve ser longo o suficiente para gerar uma amostragem significativa.

12. **Levantamento da frequência de falhas humanas** - dentro do período de avaliação, o total de eventos relacionados às ações humanas fora do esperado será dividido pelo tempo de observação. Em alguns casos encontrar a frequência implica em dividir em intervalos de tempo menores, e depois totalizar as falhas em cada intervalo, pois será possível avaliar a evolução da frequência de falhas ao longo do tempo.
13. **Levantamento da configuração do sistema sócio-técnico no início do período de acompanhamento** - neste trabalho a percepção de sistema não se limita aos equipamentos e a tecnologia de processo. Os seres humanos interagem com os sistemas físicos por meio de uma organização. Os detalhes desta organização (pessoas envolvidas, estrutura das equipes, estrutura da liderança operacional, disponibilidade de recursos, sistemas computacionais e procedimentos disponíveis, etc.) devem ser identificados. Estabelecer esta referência inicial permitirá comparar se mudanças organizacionalmente, tecnológicas ou físicas afetaram os valores das HEP.
14. **Identificação de mudanças no sistema sócio técnico no período de observação** - ao longo do período de observação das falhas, podem ocorrer mudanças significativas físicas, organizacionais, processuais, ou de pessoas. Estas mudanças estabelecem uma nova configuração do sistema, afetando a sua confiabilidade.

5.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como exemplo, apresenta-se o sistema de um compressor em uma indústria de processos contínuos. O sistema é um elemento participante direto do processo produtivo. A sua operação centraliza suas informações em equipes de campo e em uma central de controle a distância. Este sistema tem como parâmetros temperatura do processo, vazão, rotação do compressor e pressão em vários elementos do sistema (bombas, tanques, válvulas de controle, filtros, etc). A tarefa trabalhada é 'retornar a operação do compressor à normalidade após um intertravamento automático do sistema'.

O sistema inclui todos os elementos conectados ao compressor, suas válvulas de controle e bloqueio, filtros, sistemas de automação, painel elétrico, painéis de controle local e a distância, trocadores de calor e instrumentação envolvida. Não são incluídos os equipamentos responsáveis pela geração dos gases, sistemas de combate a incêndio, de ar comprimido dos instrumentos e de fluidos de resfriamento. As Tabelas 38, 39 e 40 apresentam o desenvolvimento de parte da etapa de identificação da tarefa, já caracterizando componentes do sistema, separando ações humanas e da automação, e os valores referenciais dos parâmetros.

Tabela 38 – Exemplo de análise de uma tarefa com a identificação das ações de automação e as humanas. (PLC - Programmable Logic Controller; DCS - Distributed Control System).

Etapa	Passo	Elemento	Condição	Valor	Lógica de votação	Ação	Local	Verificação	Observações e outros
Testes das lâmpadas	Teste	XXXXXX	Comando	Acionado	-	Manual	Painel local	Painel de Campo PN-XX94	
	Verificação do 1o evento	Inicializadores do TRIP	Status	Atendida	-	Manual	PLC	Tela SDCD – GR0059	
Bomba de Óleo da turbina a vapor	Monitorar condições de trip	Inicializadores do TRIP	Status	Atendida	-	Manual	PLC	Tela SDCD – GR0059	
	Partida das bombas de óleo P-3994A/B	HS XX18ST ou HS XX22ST	Comando	Acionado	-	Manual	Painel Local	Painel Local	
Operador de campo	Teste de partida da bomba de óleo J-3494A/B	PSL- XX0018	Pressão do óleo de controle	≤ 11 kgf/cm^2	-	Auto	PLC	Painel Local e Tela SDCD – GR0044	Operador de campo deve despressurizar o PI-393018
		PSL- XX0022	Pressão do óleo de lubrificação	$\leq 1,2$ kgf/cm^2	-	Auto	PLC	Painel Local e Tela SDCD – GR0044	Operador de campo deve despressurizar o PI-393022
Alinhamento das MCV's	Condições das Main Control Valves	MCV- XX352/3/ 4/ 5/	Posição	Aberta	-	Manual	Campo/ SDCD	Telas SDCD – GR0016	
		MCV- XX350/51	Posição	Aberta	-	Manual	Campo/ SDCD	Telas SDCD – GR0059	Uma MCV do C-09 deve estar aberta
		MCV- XX357/58/ 59/ 60	Posição	Aberta	-	Manual	Campo/ SDCD	Telas SDCD – GR0059 e GW0038	As MCVs 39357 e 39358 ou 39359 e 39360 abertas

Tabela 39 – Exemplo de análise de uma tarefa com a identificação das ações de automação e as humanas. (PLC - Programmable Logic Controller; DCS - Distributed Control System).

Etapa	Passo	Elemento	Condição	Valor	Lógica de votação	Ação	Local	Verificação	Observações e outros
Condições de partida	RESET de partida	Inicializadores do TRIP	Status	desativado	-	Auto	PLC	Tela SDCD – GR0059	
		LSH- XX3004	Nível do tanque elevado F-3996	= 100%	1 de 1	Auto	PLC	Telas SDCD – GR0044e GR0059	
Reset trip	Reset trip	SLL- XX3056	Rotação do J-3902	< 10 rpm	1 de 1	Auto	PLC	Telas SDCD – GR0044e GR0059	
		HS- XX3051	Comando	Acionado	-	Auto	Painel Local	Painel Local	
Reset trip	Reset trip	XV- XX3051	Posição	Aberta	-	Auto	PLC	Tela SDCD – GR0016	
		XV- XX3052	Posição	Aberta	-	Auto	PLC	Tela SDCD – GR0016	
Reset trip	Reset trip	XS- XX3055	Status	Habilitado	-	Auto	PLC	Painel de Campo PN- XX94	
		XS- XX3056 (Reset)	Status	Habilitado	-	Auto	PLC	Painel de Campo PN- XX94	
Reset trip	Reset trip	XS- XX3057 (Reset)	Status	Habilitado	-	Auto	PLC	Painel de Campo PN- XX94	
		XL- XX3053B (Sinal Pronto para partir)	Status	Habilitado	-	Auto	PLC	Telas SDCD – GR0016 e GR0059	
Causas de interrupção	Causas de interrupção	Condições de Reset de Partida	Status	Perdida	-	Auto	PLC	Tela SDCD – GR0016	
		Trip Total	Status	Ativo	-	Auto	PLC	Tela SDCD – GR0059	

Tabela 40 – Exemplo de análise de uma tarefa com a identificação das ações de automação e as humanas. (PLC - Programmable Logic Controller; DCS - Distributed Control System)

Etapa	Passo	Elemento	Condição	Valor	Lógica de votação			Observações e outros
					Ação	Local	Verificação	
Rotação de campo (1200 a 5000 rpm)	Condições de partida	SA XX3059 (Governador Eletrônico)	Velocidade do compressor	$\geq 10\%$	-	Auto	PLC	Telas SDCD – GR0016e GR0059
	Execução	HS- XX3053 (Push for rated)	Comando	Acionado	-	Manual	Campo	Painel de Campo PN-XX94
	Sinal de purga para CCC	SI- XX3056	Velocidade do compressor	$1200 \leq \text{velocidade} < 1300$ rpm	-	Auto	PLC	Telas SDCD – GW00XX
Performance	Controle anti-surge	SI- XX3056	Velocidade do compressor	≥ 5000 rpm	-	Auto	PLC	Telas SDCD – GR0016 e GW0039
	Causas de interrupção	Trip Total	Status	Ativo	-	Auto	PLC	Tela SDCD
	Controle de rotação remoto	HS- XX3059	Comando	Acionado		Manual	Painel Local	Painel Local e Tela do SDCD- GR0039

Os operadores devem:

1. monitorar a oscilação dos parâmetros conforme tabela durante a realização da tarefa;
2. manter a comunicação entre campo e central de controle;
3. verificar condição dos elementos após o intertravamento (*trip*);
4. monitorar as ações do sistema de automação;
5. realizar manobras em campo para liberação e alinhamento do sistema para nova condição;
6. diagnosticar possíveis causas antes do retorno completo do sistema;
7. testar elementos do sistema antes do retorno.

Caso todas estas ações não sejam realizadas dentro dos padrões, o sistema não retornará a operar normalmente.

Na etapa 7 da Figura 79, os efeitos de *inputs* ao sistema em análise devem ser separados das ações humanas. Variações do vapor, ar comprimido, fluidos de refrigeração, rede de energia elétrica ou gases fora de especificação podem impactar no processo, mas não pode ser atribuída uma falha humana a estas variações. Caso exista um parâmetro a ser acompanhado especificamente para as variáveis dos insumos, pode-se atribuir uma falha humana, porém não é o caso nesta tarefa. Considerando que todas as ações ficam armazenadas em um repositório de dados associado ao Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) que pode ser levantados a qualquer momento, é possível identificar toda vez em que uma destas ações ocorrer fora do esperado.

A tarefa escolhida não é de rotina, é uma situação de exceção, uma anormalidade podendo ser considerada emergência. Neste caso a etapa 10 do fluxo considera o número de vezes que cada ação humana aparece no procedimento esperado, a exemplo da ação 'monitorar'. O verbo monitorar aparece apenas uma vez entre os passos, porém acompanhando as ações de verificação dos parâmetros de partida, que são situações de monitoramento, e também o acompanhamento da rotação na última etapa do procedimento, somam-se 6 ações de monitoramento. Ocorre várias vezes a ação de 'verificar', similar a 'inspecionar', que são ações cognitivas diferentes de 'monitorar'.

O período de avaliação da etapa 11 apresentado na Figura 79 estará associado ao histórico de ocorrência de intertravamentos, de forma a gerar dados suficientes para a seleção de um modelo de predição. No período de avaliação, das informações do repositório de dados devem ser obtidas quantas vezes os parâmetros relacionados às ações de monitoramento estiveram fora do esperado. Com este levantamento obtém-se o número de ocorrências de falhas humanas. Para obter a frequência das falhas de monitoramento pode ser usado o

próprio período de avaliação total (exemplo: no período de 5 anos, a tarefa foi realizada 120 vezes, e ocorreram 20 eventos de parâmetros fora da especificação, logo pela Eq.2.19 a $HEP = 20/120$, uma probabilidade de ocorrerem falhas humanas de 16,67%). Entretanto, a avaliação do histórico de confiabilidade do sistema pode direcionar para períodos menores de levantamento das falhas humanas. Um exemplo do cálculo da frequência de falhas em intervalos menores é apresentado na Tabela 41.

Tabela 41 – Exemplo de cálculo das HEP em intervalos dentro do período de avaliação

Ano	Ações Humanas	Falhas Humanas	HEP no intervalo
1	20	4	0,2000
2	24	6	0,2500
3	26	6	0,2308
4	22	2	0,0909
5	28	2	0,0714

Neste exemplo verifica-se que os valores medidos no período demonstraram uma redução nos últimos anos da probabilidade de falhas humanas. É exatamente esta possibilidade de verificar a evolução ao longo do tempo que possibilitará avaliar se ações de engenharia de fatores humanos mudaram a confiabilidade do sistema.

Condições de anormalidade que não levaram a um outro intertravamento, mas que estavam fora do esperado, podem ser consideradas falhas humanas, de forma a ter um monitoramento deste fator.

A possibilidade de realizar uma preditiva de falhas humanas é algo promissor, pois as organizações trabalham de forma reativa, focando apenas nas mudanças comportamentais. A análise de uma causa raiz de uma falha humana vai além de um comportamento. Como visto no Capítulo 2, a engenharia de fatores humanos pode mudar as interfaces físicas e organizacionais de forma a reduzir as chances de falhar. Uma sistematização do processo de coleta de informações das falhas humanas, acompanhado de forma preditiva, podem demonstrar tendências da probabilidade de falha. Essa preditiva de falhas humanas permitiria tomada de decisões para melhorias no sistema antes que efeitos maiores ocorram.

5.4 ESTUDO DE CASO 2 - MONITORAMENTO PREDITIVO DE FALHAS HUMANAS

A seção 5.3 apresentou uma aplicação da abordagem para sistematização do monitoramento preditivo da probabilidade de falha humana. Para consolidar a metodologia um estudo de caso com um período maior e com o uso de dados obtidos do sistema de monitoramento de equipamentos será apresentado.

Neste caso, as mudanças da confiabilidade do sistema só puderam ser atribuídas de forma exclusiva pela modificação da forma em realizar o trabalho, identificada através da

mudança dos procedimentos operacionais. O aspecto físico do sistema não foi submetido há nenhum tipo de modificação e os produtos envolvidos no processamento deste sistema foram os mesmos durante todo o período analisado. Este trabalho obteve os dados das tarefas dos operadores em um conjunto de bombas industriais do tipo centrífugas verticais de multi-estágios. Os fluidos bombeados neste sistema tendiam a vaporizar e levavam a uma condição em que o fenômeno de cavitação ocorria. A cavitação pode ser prevenida através do controle do nível e da pressão nos tanques a montante das bombas. O fenômeno de cavitação pode ser percebido quando ocorre a vibração excessiva nas bombas. A relação direta entre a violação da condição operacional e a vibração das bombas era bem conhecida pelas equipes de manutenção e operação. A engenharia de manutenção da planta tem monitorado a vibração das bombas para melhorar o desempenho dos operadores, uma política que se mostrou como efetiva no aumento da confiabilidade dos equipamentos segundo a experiência dos engenheiros da planta.

5.4.1 Método

A metodologia aplicada foi composta dos seguintes passos principais:

- Estimativa da PDF da probabilidade de erro humano;
- estimativa da função de confiabilidade das bombas através da coleta dos tempos entre falhas;
- comparação dos resultados das funções encontradas entre 2 períodos que representam momentos diferentes na melhoria da tarefa através dos procedimentos operacionais.

Na estimativa da PDF da probabilidade de erro humano (HEP) o foco não foi a identificação do conjunto de fatores influentes na performance (PSF) e o seu impacto no desempenho humano. O objetivo específico foi estabelecer a probabilidade de erro humano usando os dados de campo no desenvolvimento das tarefas.

A modelagem da confiabilidade humana proposta neste trabalho não é do tipo dependente do tempo. O enfoque é para os casos mais comuns quando o ser humano comete erros por qualquer razão desempenhando uma tarefa de qualquer tipo.

Sobre a estimativa da função de confiabilidade, o método usado foi o da plotagem gráfica e a verificação do comportamento das funções de confiabilidade em dois períodos diferentes, que foram os anos que apresentaram momentos diferentes antes e após as mudanças nos procedimentos operacionais.

5.4.1.1 Modelos Matemáticos Analisados

A distribuição de Weibull foi a mais encontrada nos artigos de periódicos científicos da pesquisada nos últimos 10 anos para as análises de confiabilidade de equipamentos. A interpretação física dos mecanismos de falha a partir do modelo matemático Weibull são bem detalhadas na literatura. Especialmente se os mecanismos causais da falha são mecânicos ou eletromecânicos, já existem muitos textos disponíveis tratando do assunto.

Outras distribuições foram avaliadas como a normal, exponencial, log-normal e Log Logística. Os critérios de seleção da melhor estimativa foram o fator de determinação R^2 e o índice de AIC (Akaike), já apresentados na seção 2.1.6.3.

5.4.1.2 Coleta de dados

São dois os caminhos para estabelecer as amostras necessárias para a proposta deste estudo, um para os dados da confiabilidade das bombas e o outro para os dados de erro humano. As subseções 5.4.4 e 5.4.5 apresentam como foram desenvolvidos estes levantamentos.

Complementando os dados quantitativos foram realizadas entrevistas conforme será descrito na subseção 5.4.3.

5.4.1.3 Análise da tarefa do procedimento descrito

Muitos métodos de análise de tarefa foram apresentados no Capítulo 2.2 como parte da engenharia de fatores humanos. Neste estudo de caso uma variação do método *Hierarchical Task Analysis* (HTA) foi usado para compreender como as atividades físico mentais ocorriam durante a execução da tarefa de partida, monitoramento e parada das bombas.

Na indústria a forma como o trabalho deve ser realizado é descrita em procedimentos ou instruções específicas, e a descrição do trabalho tem uma maior acuracidade conforme o executante ganha experiência e detalha continuamente nos procedimentos escritos. A análise de tarefa usa muitas técnicas para entender a real forma com que o trabalho é executado. Usando técnicas de análise de tarefas é possível identificar adequadamente os PSF.

Como a complexidade da tarefa é um fator encontrado constantemente no ambiente industrial, é um fator decisivo para o sucesso do desempenho do executante. Neste trabalho foi considerada tarefa complexa toda aquela com mais de cinco passos, já que demanda da memória de curto prazo um controle do que ocorre antes e depois de cada passo, o que significa controlar 3 itens anteriores e 3 posteriores ao mesmo tempo. Além disso, as tarefas industriais geralmente possuem tarefas secundárias paralelas, aumentando a ocupação na memória de curto prazo .

5.4.2 Descrição e contexto do estudo de caso

Para reconhecer possíveis relações entre a confiabilidade do equipamento e a probabilidade de erro humano na interação com este equipamento, o sistema selecionado foi de bombeamento de produtos de hidrocarbonetos leves, um conjunto de 16 bombas distribuídas em sete sub-sistemas. O sistema consiste de tanques tipo esfera, bombas trabalhando em dupla redundância, válvulas de controle do fluxo, válvulas de bloqueio, tubulação e Sistemas acessórios como selagem e lubrificação. A Figura 5.4.2 apresenta um desenho simplificado do sistema. As bombas são do tipo centrífugas verticais de multi estágio (até 12 estágios).

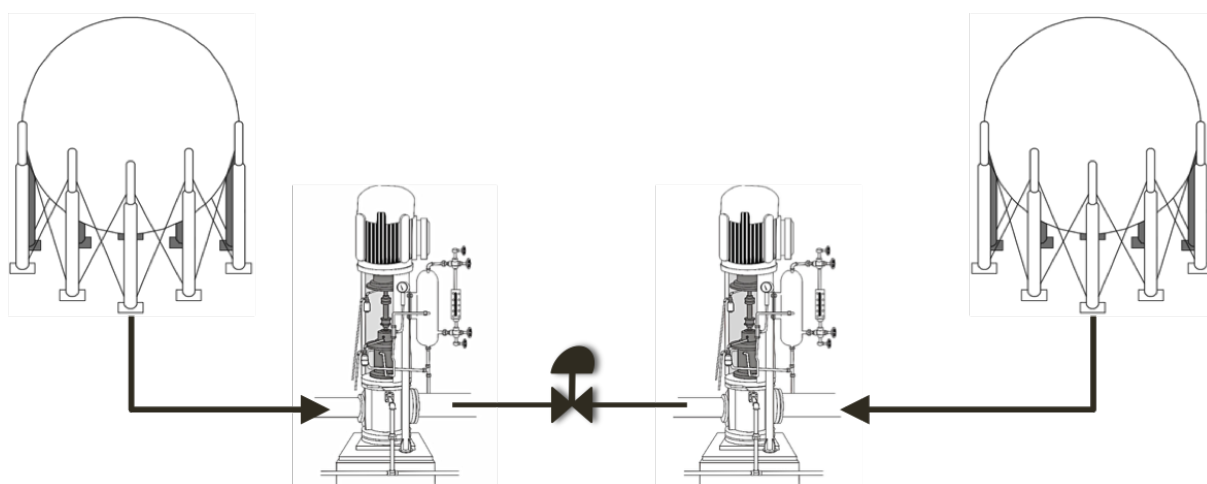


Figura 80 – Ilustração da disposição dos equipamentos em um dos conjuntos do estudo de caso.

No período de 2006 até 2014 o sistema não foi modificado fisicamente.

A coleta dos dados de falha ocorreu no período de julho de 2005 até outubro de 2016. O período de avaliação das violações humanas ao procedimento foi nos anos de 2006 até 2012, de janeiro a dezembro de cada ano (54 semanas).

A tarefa acompanhada é composta das atividades partida, monitoramento, e parada. Os dados da violação do processo de operação foram coletados usando como referência o monitoramento de vibração de cada uma das bombas.

5.4.2.1 Condições operacionais

Toda partida é requisitada e realizada localmente apesar do monitoramento por uma central de controle. assim a ação humana é desempenhada diretamente no equipamento. A temperatura externa é um fator relevante, já que os produtos bombeados volatilizam com facilidade levando a cavitação durante a partida ou a parada da bombas. Muitas partidas

no mesmo dia reduzem a possibilidade de violação já que a tubulação é mantida cheia evitando a vaporização do produto. O operador deve purgar antes da partida para o sistema de *flare*, que é o procedimento oficial da planta. Porém a atividade de purga algumas vezes consome muito tempo (até mais de uma hora foi registrado pelos operadores), atrasando todo o processo de bombeiro. Como este sistema atende diretamente os clientes da empresa, a programação de produção pode variar consideravelmente devido às demandas externas da planta. Para evitar atrasos, operadores purgam as bombas lançando o gás para atmosfera, violando a regra estabelecida. Algumas vezes quando a purga é longa esta ação de liberar o gás para atmosfera cria uma nuvem do produto, que é inflamável, o que é uma condição de alto risco de explosão.

Quando a cavitação ocorre, os diversos estágios da bomba podem falhar e, caso não ocorra a quebra, certamente os elementos se desgastam mecanicamente. Quando ocorrem as quebras por cavitação, vários estágios podem ser destruídos, portanto, eram quebras catastróficas.

O mancal superior e selo são os elementos que mais falham e levam às quebras das bombas. Foi mudado o anel de desgaste de algumas bombas. Porém, o efeito nas quebras não foi considerado significativo pelos entrevistados.

As esferas estão o tempo todo com duas fases, gás e líquido. O determinante para controle neste sistema é a pressão, que estabiliza o conjunto. Na saída das esferas existe uma válvula tripla, e na partida o operador deve verificar a posição. As manobras na válvula tripla não são um processo natural a um operador mediano, portanto, é um elemento complexo na operação do sistema.

Um isolamento térmico das tubulações e nas entradas/ saídas das bombas foi feito entre os anos de 2008 e 2009 para alguns dos conjuntos bombas e esferas. Porém, a modificação do isolamento térmico não foi tratada como significativa pelos entrevistados para efeito no resultado geral das violações e falhas. Além disso, uma simulação computacional feita pela engenharia da empresa demonstrou que a solução não seria efetiva.

No período de 2008 a 2009, algumas ações para mudar a tarefa foram tomadas de forma a reduzir as violações ao procedimento e, por consequência, as falhas do equipamento. Estas ações modificaram os procedimentos operacionais. as partidas foram limitadas a determinadas horas do dia na qual as temperaturas estavam abaixo de 28°C. As partidas também só poderiam ser realizadas quando pelo menos um dos tanques do sistema a ser bombeado estivesse completamente cheio. A primeira ação foi feita para evitar problemas de vaporização nas bombas, e a outra para evitar baixos níveis dos tanques, assim como, baixa pressão da linha a montante da bombas. Resumidamente, as partidas passaram a ser feitas em um horário apropriado com menor temperatura e alternando entre tanques cheios e vazios para garantir a pressão mínima na linha.

A ação de limitar as horas do dia para realizar partidas levou a ocorrência de mais partidas por dia para atender a demanda, como pode ser verificado na Tabela 42.

Tabela 42 – Número de ciclos operacionais em 2 períodos distintos

Ano	Ciclos operacionais
2006	4600
2012	8962

Como verifica-se na Tabela 42, em 2012 ocorreram quase o dobro de partidas do que em 2006. Esta diferença levou a escolha deste anos como referência para o levantamento das violações dos operadores ao procedimento.

5.4.2.2 Seleção dos períodos de avaliação antes e após as mudanças operacionais

Para os dados de falha das bombas o período analisado foi dividido em dois momentos, o primeiro de julho de 2005 para dezembro de 2008 e o segundo de janeiro de 2009 até outubro de 2016. A decisão para separar nestes dois momentos foi fundamentada pela identificação do momento em que ocorreram as mudanças nos procedimentos de partida, iniciado em 2008 e consolidados em 2009.

Para a frequência de violações também foram selecionados dois momentos entre as modificações do procedimento operacional. Como o levantamento da frequência de violações era em base semanal e o mínimo de ciclos por semana sempre foi maior que 30, uma quantidade significativa de ocorrências eram obtidas a cada ano. Assim, foram escolhidos apenas dois anos que representassem o desempenho antes e após as mudanças, e foram os anos de 2006 e 2012, pois como foi visto na Tabela 42, o número de partidas nesses anos é quase o dobro entre eles.

5.4.3 Entrevistas

Para compreender sobre as falhas das bombas e a possível relação com as ações humanas foram realizadas entrevistas com operadores, supervisores, técnicos e engenheiros de manutenção e engenheiros de confiabilidade.

Todos os entrevistados tinham mais de 10 anos trabalhando com bombas centrífugas, e no mínimo 5 anos acompanhando o desempenho do conjunto de equipamentos deste estudo (no caso dos operadores todos trabalharam na área específica por mais de 10 anos). No total foram (i) 6 operadores, (ii) 4 engenheiros e (iii) 2 técnicos de manutenção.

As entrevistas eram conduzidas com enfoque diferente para cada um dos grupos, sempre com tópicos definidos e no formato de descrição episódica (entrevistado contando casos reais para exemplificar). Apenas uma pergunta foi comum a todos os grupos: se

alguma ação de mudança no sistema físico ao longo do período analisado mudou a frequência de falhas. A seguir são apresentados os tópicos para cada um dos grupos entrevistados.

- Operadores - como realizam a tarefa, quais as dificuldades encontradas na realização da tarefa, tempo de realização, contexto em que realizam a tarefa, quantas atividades realizam paralelamente a tarefa analisada.
- Engenheiros - quais as causas mais comuns de falhas, quais ações já haviam sido realizadas para reduzir as falhas, o que não deu certo, o conhecimento deles da tarefa, quais os modos de falhas mais determinantes.
- Técnicos de manutenção - resultados das análises de causas, quais as causas mais comuns das falhas, o que poderia ser feito para redução das falhas, efetividade do monitoramento das bombas.

Alguns operadores entrevistados já tinham cargo de supervisão quando foram entrevistados, mas atuaram por mais de uma década em campo.

5.4.4 Coleta de dados de falhas das bombas

Os dados foram coletados no sistema de gerenciamento dos registros de manutenção, que detalha os eventos nas Ordens de Manutenção. Apenas falhas com parada da operação das bombas foram contabilizadas. Como os sistemas de bombeiro são redundantes, na maior parte dos casos o ciclo de operação foi mantido quando um dos elementos do sistema falhava. Uma lista de 71 falhas foi registrada no período de julho de 2005 até Junho de 2016, por diferentes modos e causas. a Tabela 43 é um exemplo de uma parte da lista de falhas, e posteriormente organizada de forma a calcular os tempos entre falhas (*Time Between Failures* (TBF)) de cada bomba conforme pode ser verificada na Tabela 44.

Tabela 43 – Falhas ocorridas nas 16 bombas no período de 11 anos

Falhas	Id da bomba	Data
1	4	Jul/2005
2	16	Oct/2005
3	2	Oct/2005
4	5	Jan/2006
5	13	Mar/2006
6	3	Aug/2006
7	4	Aug/2006
8	10	Jan/2007
9	3	Jan/2007
10	4	Jan/2007
11	1	Jan/2007
⋮	⋮	⋮
71	3	Jun/2016

Tabela 44 – Cálculo do Tempo Entre Falhas (*TBF*) das bombas Id 3 e 4.

Sequência das Falhas	ID da bomba	Data	<i>TBF</i> * (dias)
1	4	Jul/2005	-
7	4	Jan/2007	539
10	4	Mar/2007	172
25	4	Dez/2007	263
26	4	Fev/2008	74
6	3	Aug/2006	-
9	3	Jan/2007	153
28	3	Sep/2007	224
31	3	Jun/2008	269
34	3	Nov/2008	166

* *Time Between Failures*

5.4.5 Coleta das violações operacionais ao procedimento

Inicialmente, foi identificado qual o procedimento operacional em uso, e detalhado através de uma técnica de análise de tarefas.

Existe procedimento, mas não é usado na rotina, pois a tarefa é muito familiar ao operador.

O processo de contagem das violações foi desenvolvido baseado nos picos de vibração e nas atividades desempenhadas pelos operadores no momento em que esses picos ocorriam. O procedimento operacional está apresentado na Figura 81, e possui apenas duas etapas descritas: partida e a parada. A etapa de monitoramento existe na tarefa real mas não estava descrita.

PARTIDA

- Alinhamento de Válvulas - Abra a válvula do tanque em uso; feche as válvulas dos outros tanques; se aplicável, abra a válvula de transferência na ponte; Abra a válvula da bomba de sucção; Desconecte a válvula de descarga.
- Se aplicável, informe os outros operadores sobre a manobra para confirmar qualquer condição anômala no sistema.
- Verifique a existência de sinalizadores de aviso (warning flags) no botão Iniciar.
- Verifique o sistema de drenagem.
- Verifique se o sistema de lubrificação está funcionando.
- Verifique as informações do sistema de refrigeração de água.
- Faça a escorva da bomba.

CUIDADO: Produtos vaporizados devem ser enviados para o sistema de flare.

- Comunique outros operadores, inclusive confirmando, o início do bombeamento.
- Informe a partida para a sala de controle.
- Início do bombeio.
- Abra a válvula de descarga observando as condições de operação da bomba de acordo com as informações no local.
- Espere até que as condições de operação da bomba se estabilizem (ruído, pressão, vazão).
- Verifique com a sala de controle ou em subestação elétrica a amperagem do motor.
- Monitore a vazão esperada na tela do sistema supervisorio.

PARADA

- Feche a válvula de descarga.
- Aperte o botão start para desligar, local ou remotamente na sala de controle.
- Se aplicável, feche a água fria.

Figura 81 – Procedimento para o ciclo operacional da bomba - Partida e Parada

A próxima ação foi rastrear a tarefa enquanto ela era realizada em campo. A maior parte das execuções desta tarefa que foram acompanhadas foram realizadas por operadores experientes. Paralelamente, para entender a tarefa, foi desenvolvida um conjunto de entrevista com os operadores. Foi neste processo de acompanhamento em que foi identificado a etapa Monitoramento, ao final da etapa de partida. Um passo para monitorar a vazão da bombas na tela do sistema supervisorio era recomendada, porém foi observado que o necessário monitoramento não era apenas para o parâmetro Vazão. Outros parâmetros como pressão, nível e temperatura do tanque de esfera, pressão de saída da bombas, tempo de bombeio, vibração da bombas e temperatura ambiente eram monitorados pelos operadores experientes. A automação neste sistemas não controlava todo o processo e em muitos casos o operador interagia com o sistema para realizar ajustes. Todos os parâmetros e os ajustes deveriam ser gerenciados na mente do operador durante o ciclo de operação, apesar do operador da central de controle receber alarmes. Alarmes ocorrem quando o

sistema já chegou a extremos, o que em um monitoramento adequado seria evitado.

Apesar desta tarefa ser familiar para os operadores, o número de passos para realizar o procedimento é muito grande para ser memorizado (sobrecarga da memória de curto prazo). O primeiro passo do procedimento escrito, alinhamento das válvulas, em realidade é a soma de pelo menos cinco ações em condições normais, e algumas são ações condicionais, ou seja, quando uma decisão precisa ser tomada (exemplo: "se aplicável, então..."). Ciclos de operação geralmente eram desempenhados por uma única pessoa. O operador da central de controle monitorava, mas não acompanhava diretamente nenhum passo do procedimento. Neste caso, a tarefa descrita no procedimento escrito foi considerada complexa, por que o número de passos apenas na etapa de partida era superior a 7. Esta tarefa foi considerada de alta propensão ao erro humano.

5.4.5.1 Definição da violação ao procedimento

A violação é uma atitude consciente contrária ao prescrito para a tarefa, porém com o objetivo melhorar algo. É um desvio, mas em busca de ajudar a ser mais eficiente em algumas das metas da tarefa.

Neste estudo de caso, a violação era anotada toda vez que uma vibração excessiva era registrada no sistema de monitoramento da bomba, considerando que um valor pré selecionado em mm/s foi superado. A bomba é monitorada por um sistema automático que registra em um repositório de dados. A mensuração da vibração era realizada enquanto a bomba operava, não apenas durante partida e parada, e valores que violavam a vibração global da máquina pré-selecionada poderiam ocorrer em qualquer momento durante a operação. Em alguns casos ocorreu a superação do nível pré-selecionado muitas vezes. Como exemplo, um dos registros apresentou uma hora contínua de vibração excessiva após a partida. A violação poderia estar associada há uma omissão de ação humana para desligar a bombas, verificar o nível baixo das esferas, verificar a baixa a pressão na linha a montante da bombas, porém em todos os casos ocorreu um erro independente do modo de falha.

A Tabela 45 apresenta um conjunto de violações por equipamento para uma semana específica, identificando o número de ciclos de partida e parada das bombas e as violações ocorridas para cada caso.

Tabela 45 – Exemplo de coleta de ciclos operacionais e violações ocorridas em uma semana

Id da bomba	Ciclos operacionais	Violação
1	4	34
2	1	0
3	17	6
4	2	71
5	2	0
6	21	295
7	18	1
8	8	0
9	1	2
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	1	0

Para exemplificar a Figura 82 apresenta a tela de monitoramento de vibração de uma bomba com o *set Point* identificado em 3 mm/s. Neste caso, três ciclos de partida podem ser vistos. O primeiro e o segundo ciclo são casos típicos de violação na partida da bomba e posteriormente estabiliza. O terceiro ciclo é um caso normal, sem violações. Entretanto, não se sabe quais as causas das violações, se na partida, no alinhamento das válvulas, no controle de nível do tanque, ou mesmo se aquele instante ocorreu um desgaste prematuro de um componente da bombas.

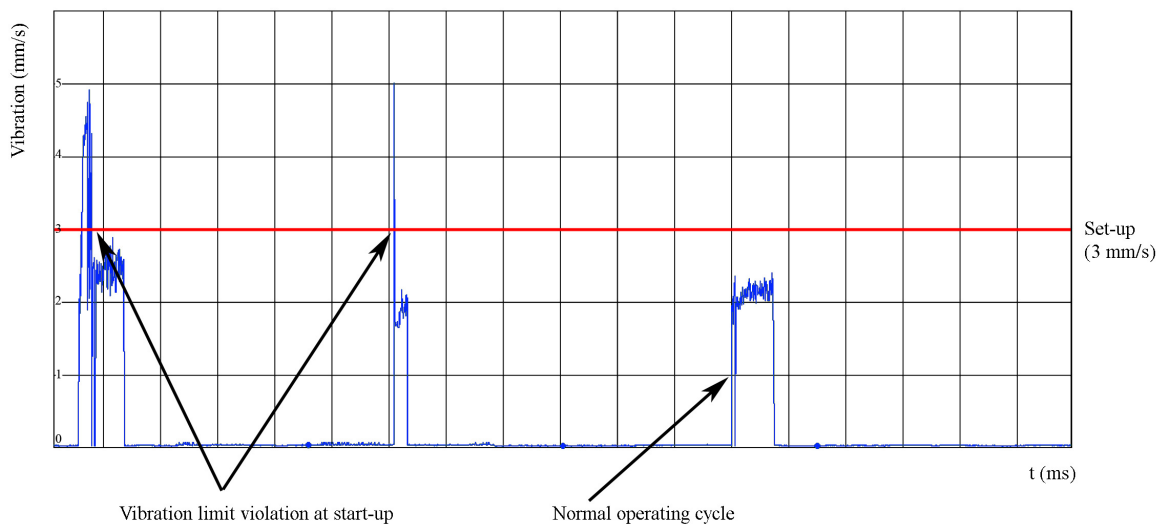


Figura 82 – Tela de monitoramento da vibração global da bomba, exemplos de vibração excessiva na partida e de ciclo sem vibração excessiva.

Na Figura 83 é apresentado um outro exemplo de tela de monitoramento da bombas. O primeiro ciclo mostra uma alta vibração no fim do ciclo operacional. Neste caso a vibração excessiva é uma violação a etapa de monitoramento, e possíveis causas poderiam ser baixa pressão ou baixo nível do tanque esférico.

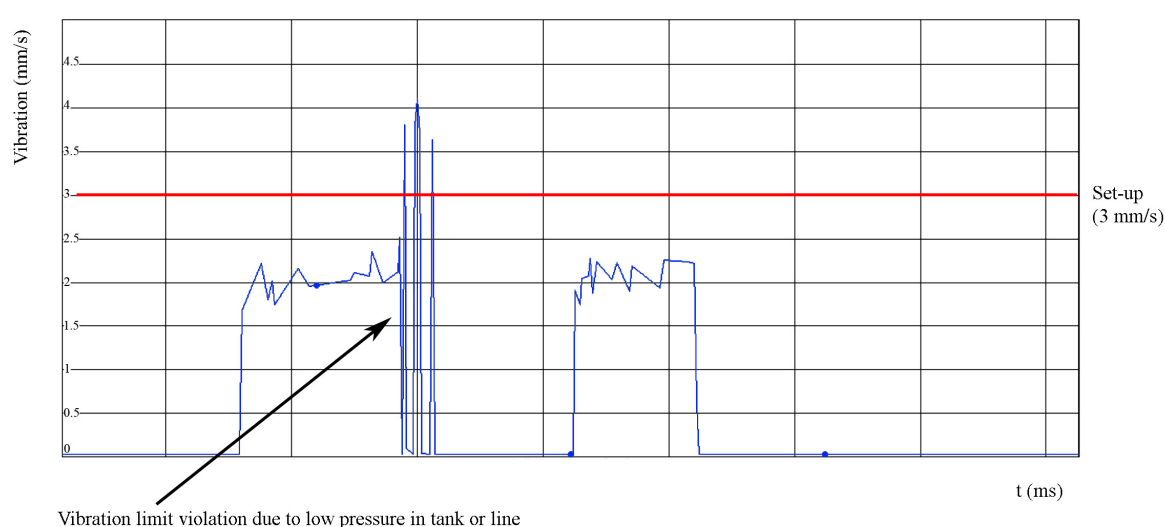


Figura 83 – Tela de monitoramento da vibração global da bomba, exemplo de vibração excessiva no final do ciclo de operação

O equipamento 6 identificado na Tabela 45 na semana em que foi acompanhado gerou mais violações do que ciclos operacionais. No conjunto total de dados de ciclos operacionais ocorreram alguns casos como este, onde a frequência de violações foi maior do que os ciclos. Nestas situações o que ocorreu foi que a vibração excessiva permaneceu além do ciclo de partida. As violações podem ser maiores que os ciclos, porém a frequência ou probabilidade deve ser um número real entre 0 e 1. Como o denominador para o cálculo da frequência relativa é o número de ciclos, o número de violações foi limitado ao número de ciclos. Dessa forma, o equipamento 6 contabilizou apenas 21 violações, o que é o total de ciclos operacionais, o máximo que poderia obter.

A Tabela 46 apresenta o resultado da frequência de violações por 51 semanas.

Tabela 46 – Violações por ciclos para uma semana de operações, com correção dos valores das quantidade de violações e cálculo da frequência

Tempo (semanas)	Ciclos de Operações	Violações	Revisão quantidade violações	Frequência de violações
1	47	7	7	0,15
2	65	102	65	1,00
3	46	41	41	0,89
4	44	137	44	1,00
5	36	104	36	1,00
6	56	71	56	1,00
7	48	33	33	0,69
8	32	46	32	1,00
9	48	70	48	1,00
10	56	27	27	0,48
⋮	⋮	⋮		⋮
51	49	23	23	0,47

Na Tabela 46 foi acrescentada uma coluna em que foram revisados os valores, limitando o total de número de violações contabilizadas. Este ajuste foi bem aceito como regra pelo grupo de trabalho, já que em qualquer dos casos o operador deveria estar alerta para condições fora do especificado no ciclo, e em qualquer etapa deste.

A coluna 'Frequência de Violações' da Tabela 46 é calculada da mesma forma proposta na Eq. 2.19, então é o valor da *Human Error Probability* (HEP) para uma semana.

5.4.6 Resultados

Os resultados encontrados na estimação das funções de confiabilidade das bombas e da probabilidade de erro humano serão apresentados a seguir.

5.4.6.1 Função Confiabilidade das Bombas

O conjunto de dados dos dois períodos (2005 a 2008 e 2009 a 2016) apresentou como melhor ajuste a distribuição de weibull com três parâmetros. Os resultados do coeficiente de determinação dos vários modelos testados são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 – Coeficiente de determinação (R^2) e AIC para os modelos matemáticos estimados das funções densidades das falhas das bombas testados, para os períodos de operação selecionados

Modelos	2005-2009		2009-2016	
	R^2	AIC	R^2	AIC
Exponencial	0,96845	-83,924	0,98513	-121,74382
Weibull	0,98796	-123,9642	0,98756	-122,3714
Lognormal	0,97388	-92,671	0,97901	-48,2424
Log-logística	0,97698	-61,2206	0,97593	-48,3022

Os parâmetros encontrados para distribuição de weibull são apresentados na Tabela 48 para os dois períodos analisados.

Tabela 48 – Parâmetros obtidos para o modelos Weibull para os conjuntos de dados de falha dos períodos selecionados

Periodo (anos)	$F(t)$ Estimador	β	η (dias)	δ (dias)
2005-2008	Mean Rank	0,598	173	47
2009-2016	White Rank	0,928	615	-11

Os dados das falhas de bombas geraram duas curvas diferentes. A Figura 84 apresenta os gráficos das funções da confiabilidade para os dois períodos. Verifica-se que no período após as mudanças dos procedimentos operacionais (2009 a 2016) a confiabilidade apresenta-se com valor maior em quase todos os pontos se comparada aos do período anterior.

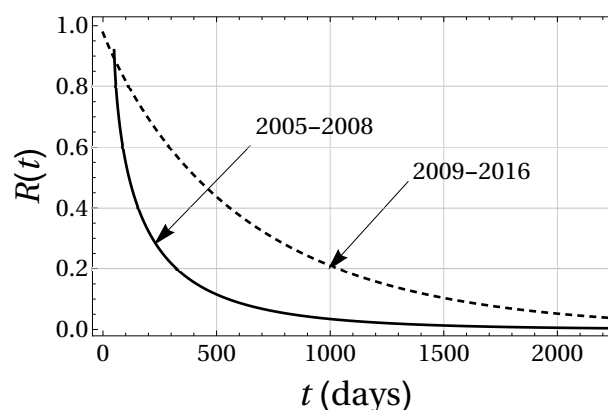


Figura 84 – Função confiabilidade das bombas para diferentes períodos, antes e após a modificação dos procedimentos operacionais

A Figura 85 apresenta as funções densidade de probabilidade das falhas das bombas para os dois períodos analisados.

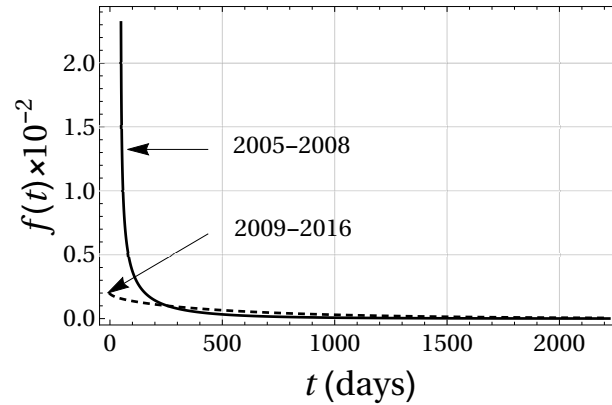


Figura 85 – Função densidade de probabilidade das quebras das bombas $f(t)$ para os períodos de 2005 a 2008 e de 2009 a 2016

Nota-se na Figura 85 o comportamento exponencial decrescente das duas funções, porém com características iniciais muito distintas. O período posterior às mudanças na tarefa demonstra uma estabilidade na densidade das falhas ao longo do tempo, enquanto o período anterior concentra-se no início dos valores da variável tempo entre falhas.

A Figura 86 apresenta a taxa de falhas instantânea $h(t)$ para os dois períodos.

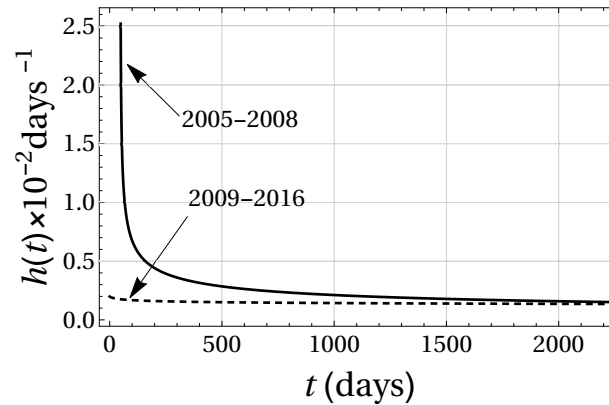


Figura 86 – Taxa de falhas instantânea da quebra das bombas $h(t)$ para os períodos de 2005 a 2008 e de 2009 a 2016

Verifica-se na Figura 86 que a taxa de falhas apresenta um comportamento decrescente com a variável tempo, principalmente no período anterior às mudanças da tarefa. Já no período pós mudanças da tarefa, o comportamento parece constante ao longo da variável tempo.

É importante ressaltar que os resultados das Figuras 85 e 86 possuem parâmetros de localização diferentes (a vida mínima de uma curva é $\delta = 47$ dias e da outra é $\delta = -11$ dias), o que no gráfico confunde. Atendem a premissa de distribuição de probabilidade da integral total ser 1.

5.4.6.2 Função densidade de probabilidade da HEP

O processo de seleção do modelo matemático de distribuição da probabilidade de erro humano usou a mesma abordagem e formulação matemática desenvolvida para a estimação e seleção do modelo para as falhas das bombas. A decisão foi fundamentada no processo de comparação da plotagem gráfica. Nos períodos selecionados (2006 e 2012) o modelo com o melhor ajuste foi o de weibull com três parâmetros com o estimador Mean rank.

A Tabela 49 apresenta os parâmetros estimados para a distribuição ajustada dos dados das probabilidades de erro humano para os dois períodos.

Tabela 49 – Parametros da distribuição de Weibull para a *HEP* para os dois períodos selecionados

Periodo (anos)	$F(t)$ Estimator	β	η (dias)	δ (dias)
2006	Mean Rank	1,096074	0,274178	0,026568
2012	White Rank	1,593831	0,109171	0,002786

Os resultados dos critérios de *goodness of fit* para os modelos matemáticos testados são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – *Goodness of fit* da função densidade da *HEP* para o modelo de Weibull.

Modelos	2006	2012
	R ²	R ²
Exponencial	0,9698	0,95345
Weibull	0,9891	0,9779
Lognormal	0,9312	0,97068
Log-logistic	0,9541	0,9541

Verifica-se na Tabela 50 que o modelo de Weibull obteve os melhores resultados quanto ao ajuste aos valores da amostra de HEP.

A Figura 87 apresenta as funções de densidade das probabilidades de erro humano para os períodos de 2006 e 2012. Deve-se atentar na análise, já que a ordenada deste gráfico é uma função densidade de probabilidade de uma probabilidade.

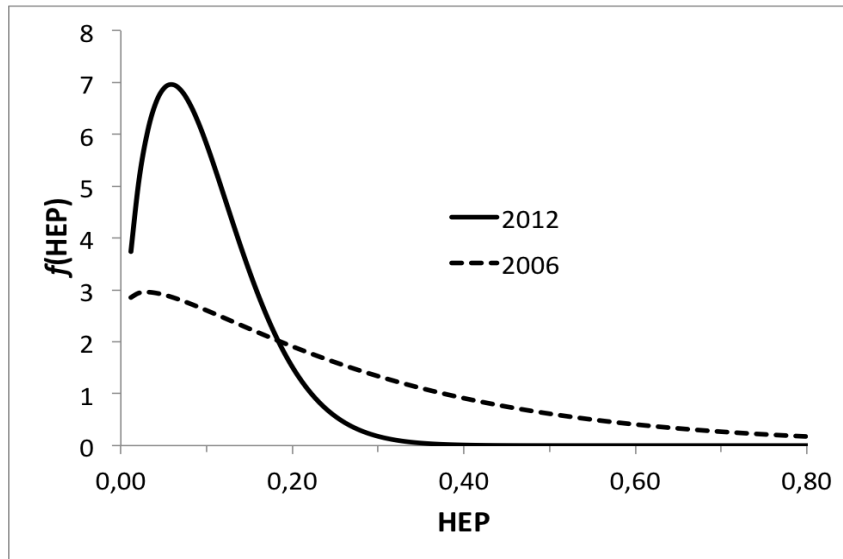


Figura 87 – Frequência de violações semanais (*HEP*) de 2006 e de 2012.

Verifica-se na Figura 87 que os valores do período do ano de 2012 (Janeiro a Dezembro) representando os novos procedimentos operacionais, tem a sua densidade concentrada em valores menores da probabilidade de erro humano, ou seja, em valores de frequências de violações menores que o período anterior. Para o ano de 2012, observa-se que, a partir da probabilidade de erro humano 0,35, a densidade é praticamente igual a 0. Nesse mesmo ponto, para o ano de 2006, nota-se que o valor da densidade é maior que 0, ou seja, ainda existe uma probabilidade de 0,35 de violações ocorrerem nos ciclos de operação da bomba em uma mesma semana.

A Figura 88 apresenta o complementar da função densidade acumulada para os dois períodos. Como a variável independente neste caso é uma probabilidade de erro, a função apresentada na Figura 88 é calculada de forma similar a função confiabilidade das bombas, pois é a complementar da função acumulada da densidade de falhas. Esta função não é exatamente a confiabilidade dos operadores, mas mostra o comportamento da variável HEP das falhas dos operadores para os dois períodos.

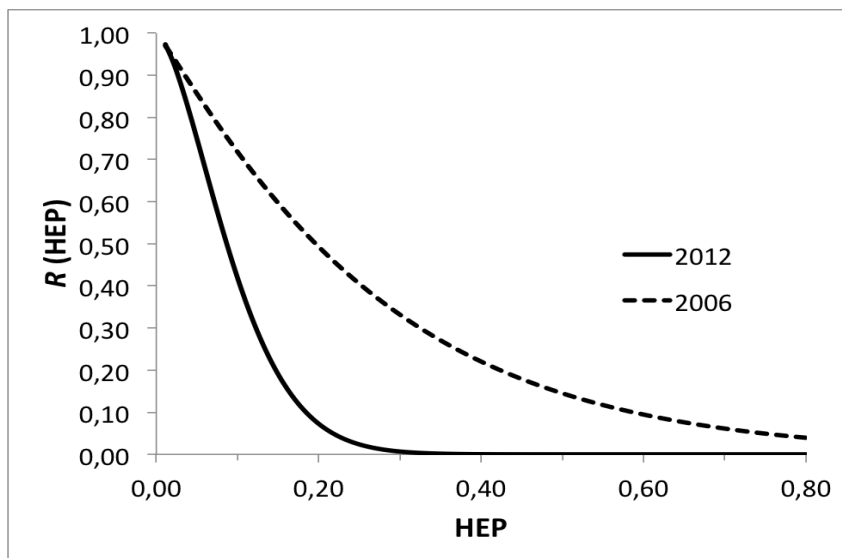


Figura 88 – Função confiabilidade humana $R(t)$ dos anos de 2006 e 2012

Pode-se notar que a probabilidade de falhas humanas no ano de 2012 é menor que do ano de 2006. Comparando os períodos da confiabilidade das bombas e das probabilidades de erros humanos, é possível observar que valores menores de probabilidade de erro humano coincidem com valores maiores de confiabilidade do equipamento. O aumento da confiabilidade humana foi devido a mudança dos procedimentos operacionais, e isto coincide com o aumento da confiabilidade do equipamento. Se nenhum outro fator puder ser atribuído a esta aumento da confiabilidade das bombas, a PDF da probabilidade de erro humano expressa também a melhoria na confiabilidade do equipamento. Se o sistema físico continuou o mesmo em todo o período analisado, conforme foi atestado nas entrevistas com os operadores e com os engenheiros que trabalharam no período, a função de confiabilidade do equipamento expressa as mudanças graficamente da probabilidade de erro humano.

Foram verificados casos no conjunto total de dados em que as falhas de bombas não ocorreram entre momentos de vibração excessiva registrados. O mais comum foram os casos em que os momentos de vibração excessiva ocorreram em um tempo anterior às falhas dos equipamentos (a falha foi definida como o momento em que a bomba fica fora de operação para manutenção). Em alguns casos, mesmo quando ocorreu 3 semanas contínuas de violações nos níveis de vibração, não levou a falha da bomba, que só aconteceu após mais de 4 meses deste registro de vibração. A falha catastrófica da bomba não é usual. As falhas ocorrem se outras condições também estão presentes, e a combinação de fatores deteriora lentamente os componentes das bombas. Muitos ciclos de operação, operando com nível baixo, em dias quentes, com baixo nível de vibração e com componentes internos da bombas em condição de desgaste inicial, podem levar a uma falha mais do que uma violação ao procedimento pode levar a uma falha imediatamente a violação.

As mudanças dos procedimentos operacionais tornaram possível a estabilização e um controle melhor do sistema. A consequência de um sistema estabilizado é o aumento da confiabilidade deste sistema. As mudanças na forma de realizar a tarefa foram feitas apenas por um melhor gerenciamento do trabalho, o que é uma ação organizacional e portanto um fator de influência (*Performance Shaping Factor* (PSF)) conhecido nas avaliações da confiabilidade humana. Muitos pesquisadores consideram que o projeto da tarefa e os fatores organizacionais são os fatores mais significantes na avaliação da confiabilidade humana (referências).

Todos os fatores, o modelo matemático selecionado e o processo de estimação dos seus parâmetros são fontes de incertezas e tem significativo impacto no resultado final. Como o objetivo deste trabalho é apresentar as correlações na forma gráfica das funções da probabilidade de erros humanos e as funções de confiabilidade do equipamento, a quantificação da incerteza associada a este processo não foi desenvolvida. Entretanto, o autor é consciente sobre estas fontes de incertezas. Conclusões ou aplicações quantitativas destes resultados devem ser associadas com uma avaliação da incerteza total.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A disponibilização cada vez maior de variáveis para monitorar e controlar o processo pode ser aproveitada para a função de acompanhar o desempenho humano, desde que a tarefa esperada venha a ser associada aos eventos (parâmetros fora de especificação, ações indevidas de controle, etc.). Estabelecidas as relações tarefas \times eventos, os padrões para a performance humana podem ser monitorados preditivamente. O processo proposto neste capítulo prevê o uso de parâmetros de processo como referência para julgar a ação humana.

A abordagem proposta possibilita a aplicação do processo de coleta dos dados sobre desvios humanos para outros setores industriais. A cada contexto outros parâmetros de monitoramento da condição dos sistemas analisados serão usados, seguindo a lógica de associar eventos às tarefas humanas, portanto, replicável.

O método proposto para estimar a HEP - *Human Error Probability* usando um parâmetro de monitoramento da condição do equipamento é uma contribuição deste trabalho para as abordagens de engenharia de fatores humanos. O estudo foi em um ambiente industrial específico, mas é aplicável a outros como geração de energia, centros cirúrgicos, operação de máquinas móveis em setores diversos como florestal e mineração, e para transporte de passageiros (ônibus, aviões, trens ou navios).

No estudo de caso usou-se a função densidade da HEP - *Human Error probability* como uma referência para capturar o aumento na confiabilidade do sistema. O modo de falha 'vibração excessiva' leva ao desgaste de elementos da bomba o que leva a falhas

da bomba. A análise de tarefas demonstrou que o desempenho humano é responsável direto pelas situações de alta vibração. Durante os 11 anos analisados o sistema não foi modificado fisicamente em seus elementos, e o aumento da confiabilidade não pode ser justificado por mudanças desta natureza. Portanto, os resultados encontrados só puderam ser atribuídos a mudança nos procedimentos de operação, ou seja, a forma como a tarefa era realizada. Valores menores de *Human Error Probability* (HEP) são mais esperados após as mudanças nos procedimentos que antes.

Ao invés de separar na análise de causas o sistema técnico das causas humanas, um monitoramento preditivo do erro humano é uma abordagem integrada para aumentar a confiabilidade de todo o sistema.

Em um sistema com a interação física direta do ser humano, o aumento da performance humana de uma tarefa pode ser capturado nas curvas da função confiabilidade do equipamento. Os resultados demonstraram que a função confiabilidade do sistema conseguiu capturar as mudanças no sistema sociotécnico.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou tratar como avaliar a influência do fator humano na confiabilidade de sistemas industriais reais. O ambiente de sistemas em operação demandam processos para obter dados que não são como um projeto de experimento em laboratório que mantém um maior controle das condições de operação e sobre os dados das variáveis. Um dos pontos tratados neste trabalho foram as causas das incoerências dos dados completos para as análises de confiabilidade, e que tem como consequência poucas informações a serem capturadas sobre o impacto do ser humano na confiabilidade.

No Capítulo 2, de título 'Revisão sobre confiabilidade de sistemas, Engenharia de Fatores Humanos e Modelagem por Equações Estruturais', foram apresentados os processos que os engenheiros de confiabilidade percorrem para estimar as funções características da confiabilidade que possam realizar previsões consistentes. A revisão passou do levantamento de dados, pela definição do escopo da análise, avaliação da amostra, definição de falha, a consideração se é ou não reparável, seleção do modelo matemático, critérios de ajuste para estimativa dos parâmetros etc. Esse conjunto de possibilidades levam os engenheiros de confiabilidade das empresas a terem dificuldade em lidar com muitos conceitos, métodos, sistemas computacionais, modelos matemáticos e abordagens diversas. A complexidade deste processo pode levar a decisão incorretas e a perdas de grande impacto.

Ainda na revisão feita no Capítulo 2, de título 'Revisão sobre confiabilidade de sistemas, Engenharia de Fatores Humanos e Modelagem por Equações Estruturais', foi reservado espaço para a Engenharia de Fatores Humanos, e em especial, aos fatores que influenciam o desempenho humano quando executam tarefas no ambiente industrial. Foram apresentadas categorizações e como os fatores são usados nos métodos para avaliação quantitativa. A relevância da identificação dos fatores deve-se a grande variabilidade do desempenho do ser humano quanto ao contexto, portanto, por ser mais sensível do que os sistemas físicos o estudo das oscilações contextuais é importante para a compreensão do fenômeno das falhas humanas.

Para tratar das inter-relações entre as variáveis no processo de amostragem e de determinantes da confiabilidade de sistemas foi apresentada a Modelagem de Equações Estruturais (MEE) que é uma abordagem para problemas multivariáveis. Não foram encontrados trabalhos que tenham como objeto de estudo a aplicação da confiabilidade de sistemas ou humana, portanto, a aplicação da MEE para melhor compreender os elementos que determinam a confiabilidade foi considerada inovadora.

No Capítulo 3, de título 'MEE - Modelagem por Equações Estruturais dos fatores da confiabilidade de sistemas e de sua amostragem', a relevância do processo de amostragem que é crítica para qualquer estudo que envolve levantamento de dados, foi realizado um estudo específico sobre as causas que são determinantes para os resultados das previsões de

confiabilidade. O estudo por Modelagem de Equações Estruturais (MEE) da caracterização da amostragem para as análises de confiabilidade demonstrou a influência negativa direta das estruturas de registro de falhas nos bancos de dados sobre a qualidade da amostra. Na história das organizações os processos de informatização ocorrem em ciclos conforme a tecnologia avança, o que resultou em vários bancos com dados espalhados. Há que lembrar que a consolidação da teoria da confiabilidade de sistemas é mais nova do que muitos dos ciclos de informatização das organizações, portanto os bancos de dados não foram criados para dar informações para confiabilidade. O resultado da relevância direta da estrutura dos registros de falhas parece ser uma conclusão coerente.

No modelo estrutural selecionado, concluiu-se que o erro humano durante os registros de falhas não é relevante na qualidade da amostra. Este resultado vai de encontro a cultura de culpar as pessoas, e pode ser resultado da maturidade da comunidade de engenharia de confiabilidade nos setores industriais.

Dado que os investimentos em atualização dos sistemas computacionais, o recadastramento de registros de falhas e o desenvolvimento de novas estruturas de cadastro e banco de dados representam grandes investimentos de recursos, o caminho para uma solução em obter amostragem com dados completos e corretos não deve ser pela mudança nas estruturas de dados existentes.

O trabalho também evidencia a necessidade de desenvolver métodos que possam transformar informações de campo em dados de falhas humanas. As entrevistas realizadas com as empresas envolvidas nos trabalhos apresentados demonstram que sequer há um conhecimento consolidado para caracterizar as falhas humanas e os seus modos de falha.

Sobre o estudo do capítulo 3, de título 'MEE - Modelagem por Equações Estruturais dos fatores da confiabilidade de sistemas e de sua amostragem', da aplicação de Modelagem de Equações Estruturais (MEE) dos elementos determinantes da confiabilidade de sistemas, a solução de que o Fator Humano é determinado pelos outros elementos (Técnico, Ambiente operacional, Insumos e Organização) não foi uma escolha inicial, mas o resultado de vários testes de diversos modelos construtivos. Os resultados mostram uma grande interdependência entre os elementos, o que pode significar (i) os construtos não conseguem existir isoladamente, ou (ii) caberia uma nova elaboração do formulário de avaliação para criar independência dos elementos. Dentre as conclusões deste estudo, o Fator Humano é direta e significativamente determinado pelo Fator Organizacional. A Organização se expressa em seus processos e atividades que podem aumentar ou restringir o desempenho humano, e pode ser visto na tarefa executada. Se o sistema é uma constante interação do ser humano com a tecnologia, a frequência com que a tarefa é executada é determinante na frequência de falhas do equipamento ou sistema. Portanto, a solução para obter as *Human Error Probability* (HEP) é pelo monitoramento e análise das tarefas.

A estrutura metodológica desenvolvida e apresentada no Capítulo 4, de título 'Um

novo fator de influência na confiabilidade humana: o uso de drogas psicotrópicas', é uma contribuição significativa deste trabalho, pois é genérica e pode ser aplicada em tarefas em qualquer setor econômico. Com a concepção das atividades observáveis padronizadas a avaliação muda o foco, saindo da complexidade de uma tarefa operacional para o elemento de uma tarefa, do qual se conhece como os fatores de contexto determinam o desempenho humano.

Com a abordagem das atividades observáveis padronizadas a aplicação dos fatores de influência torna-se independente da tarefa. Os fatores de influência impactam nas atividades e são avaliados apenas uma vez. Uma tarefa será distinta da outra pela frequência com que as atividades observáveis aparecem na tarefa. Portanto, a análise de tarefas é simplificada, já que o trabalho é de contagem das atividades padronizadas que podem ser observadas.

A interpretação do analista restringe-se a identificação das atividades observáveis da tarefa. A estimativa do impacto dos fatores na tarefa é carregada do viés da interpretação do analista, portanto, com a abordagem proposta a carga de subjetividade é reduzida.

Como visto em capítulos anteriores, cada técnica de *Human Reliability Assessment* (HRA) tem suas próprias abordagens para considerar o contexto na forma de fatores de influência na performance humana. Entretanto, a proposta apresentada foi aplicada a técnicas conhecidas de HRA e provou ser flexível na inclusão dos efeitos do uso de drogas psicotrópicas no erro humano.

Uma contribuição esperada deste trabalho é estabelecer a necessidade de dados para construir uma base de conhecimento que suporte a avaliação das drogas psicotrópicas na confiabilidade humana. A experiência na aplicação do instrumento desenvolvido suportará as análises de risco e o trabalho dos engenheiros de confiabilidade em seu processo de tomada de decisão.

Como solução para obtenção de dados de falha humana, foi proposto um método que usa os parâmetros de monitoramento da condição dos equipamentos e relaciona-os às tarefas desempenhadas. A estimativa da probabilidade de erros humanos é obtida pela frequência dos desvios das tarefas. Um primeiro estudo com compressores de gás demonstrou o processo proposto pelo método. O contínuo levantamento dos desvios leva a um processo de monitoramento que pode prever o aumento das falhas humanas para os casos.

O segundo estudo de caso trabalhou sobre um conjunto de dados de 11 anos e deixa evidente a participação humana nos resultados da confiabilidade dos equipamentos, já que nenhum dos outros possíveis elementos contribuintes, como a mudança de um componente das máquinas, esteve presente no aumento da confiabilidade. A redução das falhas foi alcançada não por trocas de pessoas ou mudança comportamental, mas por revisão na tarefa (modificação dos horários de partida e monitoramento das condições de partida).

Como os estudos de caso do capítulo 5, de título 'Monitoramento preditivo de falhas humanas e a sistematização da coleta de dados', apresentaram, os sistemas já existentes de monitoramento de equipamentos podem ser usados para coletar dados para estimativa da frequência de desvios. Cada vez mais parâmetros dos processos produtivos e dos seus equipamentos são acompanhados, em busca de maior controle sobre os resultados de qualidade, econômicos, financeiros, de imagem da empresa, sobre a segurança das pessoas e meio ambiente. O método proposto pode ser aplicado a qualquer sistema automatizado, portanto, tem potencial de aplicação em qualquer setor econômico que procura melhoria de desempenho.

6.1 COMENTÁRIOS FINAIS

Na avaliação da confiabilidade humana foi escolhido o modelo de distribuição de densidade de probabilidades de Weibull. Conforme visto na revisão bibliográfica, historicamente o modelo da Lognormal que foi aplicado nas tabelas do método THERP foi o mais interpretado, pois foi método mais usado. Desenvolver análises entre possíveis modelos matemáticos de distribuição de probabilidades, não limitando à Lognormal, e às interpretações dos fenômenos relacionados ao desempenho humano, pode ampliar a interpretação matemática e a capacidade de predição da confiabilidade dos sistemas.

Uma compreensão dos resultados quantitativos da confiabilidade de sistemas deve ser considerada com uma expressão por meio do relacionamento em rede dos fatores determinantes. Uma estimativa ponderada das influências destes fatores poderia representar uma modelagem mais adequada, porém, como demonstrado particularmente para o fator humano, a complexidade para representar estes fatores considerando à condição em campo é significativa.

Há uma busca por uma representação para a confiabilidade de sistemas que seja capaz de englobar os fatores que a influenciam. Mais do que obter um valor da confiabilidade na operação dos sistemas, uma melhor compreensão do comportamento do sistema em análise.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho muitas iniciativas para a coleta de dados completos levaram a visitas nas organizações, mas nada foi encontrado com consistência adequada. No período apareceram novas técnicas de Inteligência Artificial que podem ser promissoras para acelerar o levantamento de dados completos para a confiabilidade, portanto, abre-se uma demanda para estudos aplicando estas técnicas nos banco de dados já existentes.

REFERÊNCIAS

- AKYUZ, E. Quantitative human error assessment during abandon ship procedures in maritime transportation. **Ocean Engineering**, v. 120, p. 21–29, 2016. ISSN 00298018.
- AKYUZ, E.; CELIK, E. A modified human reliability analysis for cargo operation in single point mooring (SPM) off-shore units. **Applied Ocean Research**, v. 58, 2016. ISSN 01411187.
- AKYUZ, E.; CELIK, E.; CELIK, M. A practical application of human reliability assessment for operating procedures of the emergency fire pump at ship. **Ships and Offshore Structures**, 2017. ISSN 17445302.
- AKYUZ, E.; CELIK, E.; CELIK, M. A practical application of human reliability assessment for operating procedures of the emergency fire pump at ship. **Ships and Offshore Structures**, 2017. ISSN 17445302.
- AKYUZ, E.; CELIK, M.; CEBI, S. A phase of comprehensive research to determine marine-specific EPC values in human error assessment and reduction technique. **Safety Science**, v. 87, p. 63–75, 2016. ISSN 18791042.
- AKYUZ, E.; CELIK, M.; CEBI, S. A phase of comprehensive research to determine marine-specific EPC values in human error assessment and reduction technique. **Safety Science**, v. 87, 2016. ISSN 18791042.
- AL-DHAAFRI, H. S.; AL-SWIDI, A. The impact of total quality management and entrepreneurial orientation on organizational performance. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2016. ISSN 0265671X.
- AL-GARNI, A. Z.; JAMAL, A. Artificial neural network application of modeling failure rate for Boeing 737 tires. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 27, n. 2, p. 209–219, 2011. ISSN 07488017.
- AL-REFAIE, A. Factors affect companies' safety performance in Jordan using structural equation modeling. **Safety Science**, 2013. ISSN 09257535.
- ALMALKI, S. J.; YUAN, J. A new modified Weibull distribution. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 111, p. 164–170, 2013. ISSN 09518320.
- ALVARENGA, M. A.; MELO, P. F. Frutuoso e. **A review of the cognitive basis for human reliability analysis**. 2019.
- ALVARENGA, M. A. B.; MELO, P. F. F. E.; FONSECA, R. A. **A critical review of methods and models for evaluating organizational factors in Human Reliability Analysis**. 2014. 25–41 p.
- AMBROGGI, M. D.; TRUCCO, P. Modelling and assessment of dependent performance shaping factors through Analytic Network Process. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 96, n. 7, p. 849–860, 2011. ISSN 09518320.
- American Psychiatric Association. **American Psychiatric Association Board of Trustees Approves DSM-5**. 2013.

- ANDREWS, G. et al. **Generalized worry disorder: A review of DSM-IV generalized anxiety disorder and options for DSM-V**. 2010. 134–147 p.
- ANIL, A. P.; K.P, S. TQM practices and its performance effects – an integrated model. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2019. ISSN 0265671X.
- ANTONOVSKY, A.; POLLOCK, C.; STRAKER, L. Identification of the Human Factors Contributing to Maintenance Failures in a Petroleum Operation. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, v. 56, n. 2, p. 306–321, 3 2014. Disponível em: <<http://hfs.sagepub.com/content/56/2/306.abstract>>.
- ARYEE, S.; HSIUNG, H. H. Regulatory focus and safety outcomes: An examination of the mediating influence of safety behavior. **Safety Science**, 2016. ISSN 18791042.
- ASPAROUHOV, T.; MUTHÉN, B. Exploratory structural equation modeling. **Structural Equation Modeling**, 2009. ISSN 10705511.
- ASSIS, E. M. et al. Modeling failure rate of a robotic welding station using generalized q-distributions. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v. 32, n. 2, p. 156–166, 2015. ISSN 0265671X.
- ASSIS, E. M. D. et al. Q-weibull applied to brazilian hydropower equipment. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 68, n. 1, p. 122–132, 2019. ISSN 00189529.
- BALDWIN, D. S. et al. Evidence-based pharmacological treatment of anxiety disorders, post-traumatic stress disorder and obsessive-compulsive disorder: A revision of the 2005 guidelines from the British Association for Psychopharmacology. **Journal of Psychopharmacology**, v. 28, n. 5, p. 403–439, 2014. ISSN 14617285.
- BARCLAY D., T. R. d. H. C. The Partial Least Squares (PLS) Approach to Causal Modeling: Personal Computer Adoption and Use an Illustration. **Technology Studies**, v. 2/2, n. 2, p. 285–309, 1995. ISSN 1098-6596.
- BARROS, E.; BARROS, H. M. T. **Medicamentos na prática clínica**. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 8536323175.
- BAZIUK, P. A.; RIVERA, S. S.; LEOD, J. N. M. Fuzzy Human Reliability Analysis: Applications and Contributions Review. **Advances in Fuzzy Systems**, v. 2016, 2016. ISSN 1687711X.
- BECK, J. L.; AU, S.-K. Bayesian Updating of Structural Models and Reliability using Markov Chain Monte Carlo Simulation. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 128, n. 4, p. 380–391, 2002.
- BEGOSSO, L. C. **S.PERERE - uma ferramenta apoiada por arquiteturas cognitivas para o estudo da confiabilidade humana**. 217 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 10 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-09012006-093145/>>.
- BELL, J.; HOLROYD, J. **Review of human reliability assessment methods**. [S.l.], 2009. 78 p. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Review+of+human+reliability+assessment+methods#0http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr679.pdf>>.

- BENIDRIS, M.; ELSAIAH, S.; MITRA, J. Power system reliability evaluation using a state space classification technique and particle swarm optimisation search method. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 9, n. 14, p. 1865–1873, 2015. ISSN 17518687.
- BENNETT, S. Log-Logistic Regression Models for Survival Data. **Applied Statistics**, v. 32, n. 2, p. 165–171, 1983. ISSN 00359254.
- BERTOLINI, M. Assessment of human reliability factors: A fuzzy cognitive maps approach. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 37, n. 5, p. 405–413, 5 2007. ISSN 01698141. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169814107000170>>.
- BHATIA, M. S.; AWASTHI, A. Assessing relationship between quality management systems and business performance and its mediators: SEM approach. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2018. ISSN 0265671X.
- BIPM et al. **Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement**. [S.l.]: Joint Committee for Guides in Metrology - JCGM 100:2008, 2008. 132 p.
- BIPM et al. **Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method**. [S.l.]: Joint Committee for Guides in Metrology - JCGM 101:2008, 2008. 90 p.
- BIPM et al. **Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement"– Models with any number of output quantities**. [S.l.], 2011. 80 p.
- BLACKMAN, H. S. Applicability of current HRA quantification techniques to human failures related to digital control systems. In: **Advances in Intelligent Systems and Computing**. [S.l.: s.n.], 2019. v. 778. ISBN 9783319943909. ISSN 21945357.
- BORING, R. L.; BLACKMAN, H. S. The origins of the SPAR-H method’s performance shaping factor multipliers. **2007 IEEE 8th Human Factors and Power Plants and HPRCT 13th Annual Meeting**, Ieee, p. 177–184, 8 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4413202>>.
- BORING, R. L. et al. Issues in benchmarking human reliability analysis methods: A literature review. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 95, n. 6, p. 591–605, 2010. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2010.02.002>>.
- BOT, P. L. et al. MERMOS : un projet d’EDF pour la mise à jour de la méthodologie EPFH. **Revue Générale Nucléaire**, 1998. ISSN 0335-5004.
- BOT, P. L.; RUIZ, F. Methodological Validation of MERMOS by 160 analyses. In: **International Workshop Building the New HRA: Errors of Commission from Research to Application**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 53, p. 1689–1699. ISBN 9788578110796. ISSN 1098-6596.
- CACCIABUE, P. C. Human factors impact on risk analysis of complex systems. **Journal of hazardous materials**, v. 71, n. 1-3, p. 101–16, 1 2000. ISSN 0304-3894. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10677656>>.

CAI, B. et al. A dynamic Bayesian networks modeling of human factors on offshore blowouts. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 26, n. 4, 2013. ISSN 09504230.

CALIXTO, E.; LIMA, G. B. A.; FIRMINO, P. R. A. Comparing SLIM, SPAR-H and Bayesian Network Methodologies. **Open Journal of Safety Science and Technology**, v. 03, n. 02, p. 31–41, 2013. ISSN 2162-5999. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/ojsst.2013.32004>>.

CARAYON, P. et al. Advancing a sociotechnical systems approach to workplace safety – developing the conceptual framework. **Ergonomics**, v. 58, n. 4, p. 548–564, 2015. ISSN 13665847.

CASTET, J.-F.; SALEH, J. H. Single versus mixture Weibull distributions for nonparametric satellite reliability. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 95, n. 3, p. 295–300, 2010.

CCPS. **Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety - null CCPS (Center for Chemical Process Safety)**. [s.n.], 2004. 416 p. ISBN 978-0-8169-0461-7. Disponível em: <<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0816904618.html>>.

CCPS. **Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety - null CCPS (Center for Chemical Process Safety)**. [s.n.], 2004. 416 p. ISBN 978-0-8169-0461-7. Disponível em: <<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0816904618.html>>.

CCPS. **Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety - null CCPS (Center for Chemical Process Safety)**. CCPS-2004-HRA: [s.n.], 2004. 416 p. ISBN 978-0-8169-0461-7. Disponível em: <<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0816904618.html>>.

CCPS, C. f. C. P. S. **Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 248 p. ISBN 0470118830.

CCPS, C. f. C. P. S. **Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 248 p. ISBN 0470118830.

CHANG, Y.; MOSLEH, A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, n. 8, p. 997–1013, 8 2007. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832006001232>>.

CHANG, Y.; MOSLEH, a. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents. Part 2: IDAC performance influencing factors model. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, n. 8, p. 1014–1040, 8 2007. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832006001220>>.

CHANG, Y. H. J.; MOSLEH, A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents. Part 2: IDAC performance influencing factors model. **Reliability Engineering and**

- System Safety**, v. 92, n. 8, p. 1014–1040, 8 2007. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832006001232>>.
- CHANG, Y. J. et al. The SACADA database for human reliability and human performance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 125, p. 117–133, 2013. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183201300224X>>.
- CHANG, Y. J. et al. The SACADA database for human reliability and human performance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 125, p. 117–133, 2014. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183201300224X>>.
- CHANG, Y. J. et al. The SACADA database for human reliability and human performance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 125, p. 117–133, 2014. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183201300224X>>.
- CHARLTON, U. Ergonomics: foundational principles, applications, and technologies. **Ergonomics**, v. 56, p. 1346–7, 2013. ISSN 1366-5847. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23865730>>.
- CHEN, C. F.; CHEN, S. C. Measuring the effects of Safety Management System practices, morality leadership and self-efficacy on pilots' safety behaviors: Safety motivation as a mediator. **Safety Science**, 2014. ISSN 09257535.
- CHEN, S. T. et al. A Human and Organisational Factors (HOFs) analysis method for marine casualties using HFACS-Maritime Accidents (HFACS-MA). **Safety Science**, v. 60, p. 105–114, 2013. ISSN 09257535.
- CHENIAUX, E. **Psicopatologia descritiva: Existe uma linguagem comum?** 2005. 157–162 p.
- CHRAIF, M. et al. The link between personality, aggressive driving, and risky driving outcomes – testing a theoretical model. **Journal of Risk Research**, 2016. ISSN 14664461.
- CLAYTON, A. B. The effects of psychotropic drugs upon driving related skills. **Human Factors**, v. 18, p. 241–252, 1976. ISSN 0018-7208. Disponível em: <<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=emed2&NEWS=N&AN=7119391>>.
- CORDEIRO, G. M. et al. The generalized odd log-logistic family of distributions: properties, regression models and applications. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, 2017. ISSN 15635163.
- COUTAREL, F.; DANIELLOU, F. Ergonomie. In: **Dictionnaire du corps**. [s.n.], 2008. p. 114–117. Disponível em: <<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00831297>>.
- COYNE, K.; MOSLEH, A. L. I. Nuclear Plant Control Room Operator Modeling Within the ADS-IDAC , Version 2 , Dynamic PRA Environment : Part 1 - General Description and Cognitive Foundations. v. 10, n. 7, p. 691–703, 2014.
- DAI, L.; LI, P.; ZHANG, L. Operator situation awareness assessment model in a nuclear power plant. **2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, Ieee, p. 2440–2444, 12 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5674372>>.

DEBATTISTA, C.; SCHATZBERG, A. F.; C., D. Psychotropic dosing and monitoring guidelines. **Primary Psychiatry**, v. 13, n. 6, p. 61–81, 2006. ISSN 10826319 (ISSN). Disponível em: <<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=emed7&NEWS=N&AN=2006292671%5Cnhttp://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=emed7&AN=2006292671%5Cnhttp://lib.exeter.ac.uk:4556/resserv?sid=OVID:embase&id=pmid:&id=doi:&issn=1>>.

DEKKER, S. W. A. **Ten Questions About Human Error - A New View of Human Factors and System Safety**. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 2005. 219 p. ISBN 0805847448.

DHILLON, B. **Human Reliability, Error, and Human Factors in Engineering Maintenance: with Reference to Aviation and Power Generation**. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 1439803846.

DHILLON, B.; LIU, Y. Human error in maintenance: a review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Emerald Group Publishing Limited, v. 12, n. 1, p. 21–36, 1 2006. ISSN 1355-2511.

DHILLON, B. S. **Maintainability, Maintenance , and Reliability for Engineers**. [S.l.: s.n.], 2006. ISSN 0002-7863. ISBN 0-8493-7243-7.

DHILLON, B. S. Human Reliability, Error, and Human Factors in Engineering Maintenance with Reference to Aviation and Power Generation. **CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business**, 2009.

DIJKSTRA, T. K.; HENSELER, J. Consistent and asymptotically normal PLS estimators for linear structural equations. **Computational Statistics and Data Analysis**, 2015. ISSN 01679473.

DODSON, B.; NOLAN, D. Distributions. In: **Reliability Engineering Handbook**. [s.n.], 1999. p. 88–91. ISBN 0824703642. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=ONjL1iRrZYAC&pgis=1>>.

DODSON, B.; SCHWAB, H. **Accelerated testing : a practitioner's guide to accelerated and reliability testing**. [S.l.: s.n.], 2006. 256 p. ISBN 9780768006902.

DOUGHERTY, E. M.; FRAGOLA, J. R. **Human Reliability Analysis: A Systems Engineering Approach with Nuclear Power Plant Applications**. 1st. ed. Dougherty_Fragola_1988: Wiley-Interscience, 1988. ISBN 10: 0471606146.

DRAPER, N. R.; GUTTMAN, I. Confidence Intervals Versus Regions. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 44, n. 3, p. 399–403, 1995.

DUBOS, G. F.; CASTET, J.-F.; SALEH, J. H. Statistical reliability analysis of satellites by mass category: Does spacecraft size matter? **Acta Astronautica**, Elsevier, v. 67, n. 5-6, p. 584–595, 2010.

DUFFEY, R. B.; HA, T. **Human reliability: benchmark and prediction**. Dufrey-HEP-Benchmark-2010: [s.n.], 2010. 185–196 p.

DUNNER, D. Clinical handbook of psychotropic drugs, 11th edition, revised. **JOURNAL OF CLINICAL PSYCHIATRY**, v. 63, n. 3, p. 254–254, 2002. ISSN 0160-6689.

DUNNER, D. L. Clinical Handbook of Psychotropic Drugs. **The Journal of Clinical Psychiatry**, v. 63, n. 3, p. 254, 2002. ISSN 0160-6689.

ELEVA, K. S. et al. HUM AN ERROR PROBABI LI TY COM PUTATI ON FOR. In: . [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00728558S>>.

ELMAHDY, E. E.; ABOUTAHOUN, A. W. A new approach for parameter estimation of finite Weibull mixture distributions for reliability modeling. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 4, p. 1800–1810, 2013. ISSN 0307904X.

ELMAHDY, E. E.; ABOUTAHOUN, A. W. A new approach for parameter estimation of finite Weibull mixture distributions for reliability modeling. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 4, p. 1800–1810, 2013. ISSN 0307904X.

EMBREY, D. Using influence diagrams to analyse and predict failures in safety critical systems. In: **Proceedings of the 23rd ESReDA Seminar-Decision Analysis: Methodology and Applications for Safety of Transportation and Process Industries**. Delft, The Netherlands. [S.l.: s.n.], 2002. p. 1–15.

EMBREY, D. E. Incorporating Management and Organizational-Factors into Probabilistic Safety Assessment. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 38, n. 1-2, p. 199–208, 1992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095183209290121Z>>.

FALZON, P.; Fundación MAPFRE. **Manual de Ergonomía**. [S.l.: s.n.], 2009. 707 p. p. ISBN 9788493665562.

FAUL EDGAR ERDFELDER, A.-G. L. ranz; BUCHNER, A. **G*POWER (v. 3.1.9.4)**. 2009. Disponível em: <<http://www.gpower.hhu.de/en.html>>.

FIGUEIRÔA, C. L. S. et al. Human reliability - an analysis of proportional success x fails scenarios for adjusting assessment and management risk to reality - applied to hydroelectrical energy generation. In: **Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon**. [S.l.]: Taylor & Francis Ltd, 2013. p. 375–382. ISBN 9781138001237.

FILGUEIRAS, L. V. L. APIS: Método para Desenvolvimento de Interfaces Homem-Computador em Sistemas de Segurança visando à Confiabilidade Humana. In: **I WORKSHOP SOBRE FATORES HUMANOS EM SISTEMAS COMPUTACIONAIS: COMPREENDENDO USUÁRIOS, CONSTRUINDO INTERFACES**, 1998.

FILHO, C. L. S. F. **No Title**. Tese (Doutorado) — UFBA - Universidade Federal da Bahia, 1999.

FILHO C L S FIGUEIRÔA, E. A. L. J. A. Static Fault Tree versus Dynamic Fault Tree gates - A case study in sewage treatment systems. In: **ABRISCO 2017**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–11.

FONSECA, R. a. et al. A THERP/ATHEANA Analysis of the Latent Operator Error in Leaving EFW Valves Closed in the TMI-2 Accident. **Science and Technology of Nuclear Installations**, v. 2013, p. 1–8, 2013. ISSN 1687-6075. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/stni/2013/787196/>>.

- GALÁN, S.; MOSLEH, A.; IZQUIERDO, J. Incorporating organizational factors into probabilistic safety assessment of nuclear power plants through canonical probabilistic models. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, n. 8, p. 1131–1138, 8 2007. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095183200600161X>>.
- GERTMAN, D.; BLACKMAN, H. **Human Reliability and Safety Analysis Data Handbook**. Wiley, 1994. 448 p. ISBN 9780471591108. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=weQajTYejxoC>>.
- GHOSH, S. et al. Ergonomics: A bridge between fundamentals and applied research. **Indian journal of occupational and environmental medicine**, v. 15, p. 14–17, 2011. ISSN 0019-5278.
- GOMES, C. et al. Human Reliability Analysis of Radiotherapy Procedures Using Bayesian Networks. v. 33, p. 427–432, 2013.
- GORENSTEIN, C. et al. Cognitive performance in depressed patients after chronic use of antidepressants. **Psychopharmacology**, v. 185, n. 1, p. 84–92, 2006. ISSN 00333158.
- GORENSTEIN, C. et al. Cognitive performance in depressed patients after chronic use of antidepressants. **Psychopharmacology**, v. 185, n. 1, p. 84–92, 2006. ISSN 00333158.
- GRACE, J. B. et al. Guidelines for a graph-theoretic implementation of structural equation modeling. **Ecosphere**, 2012. ISSN 2150-8925.
- GRIFFITH, C. D.; MAHADEVAN, S. Human reliability under sleep deprivation: Derivation of performance shaping factor multipliers from empirical data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 144, p. 23–34, 12 2015. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832015001453>>.
- GRIFFITH, C. D.; MAHADEVAN, S. Human reliability under sleep deprivation: Derivation of performance shaping factor multipliers from empirical data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 144, p. 23–34, 2015. ISSN 09518320.
- GROTH, K. M.; MOSLEH, A. A data-informed PIF hierarchy for model-based human reliability analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 108, p. 154–174, 2012. ISSN 09518320.
- GROTH, K. M.; SWILER, L. P. Bridging the gap between HRA research and HRA practice: A Bayesian network version of SPAR-H. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 115, p. 33–42, 2013. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.015>>.
- GUO, B. H.; YIU, T. W.; GONZÁLEZ, V. A. Predicting safety behavior in the construction industry: Development and test of an integrative model. **Safety Science**, 2016. ISSN 18791042.
- GUO, J.; MONAS, L.; GILL, E. Statistical analysis and modelling of small satellite reliability. **Acta Astronautica**, Elsevier, v. 98, p. 97–110, 2014.
- GUPTA, A.; MUKHERJEE, B.; UPADHYAY, S. K. Weibull extension model: A Bayes study using Markov chain Monte Carlo simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 10, p. 1434–1443, 2008.

- HABIDIN, N. F. et al. Total productive maintenance, kaizen event, and performance. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2018. ISSN 0265671X.
- HAIR, J. F. et al. **Multivariate Data Analysis**. [S.l.]: Pearson, 2009. 816 p. ISSN 18733476. ISBN 9780138132637.
- HAIR, J. F. et al. An assessment of the use of partial least squares structural equation modeling in marketing research. **Journal of the Academy of Marketing Science**, v. 40, n. 3, p. 414–433, 2012. ISSN 00920703.
- HAIR JOSEPH F, H. G. M. R. C. M. S. M. **A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)**. [S.l.]: SAGE Publications Inc., 2016. 384 p. ISBN 9781483377445.
- HALL-ANDERSEN, L. B.; BROBERG, O. Integrating ergonomics into engineering design: The role of objects. **Applied Ergonomics**, v. 45, p. 647–654, 2014. ISSN 00036870.
- HENRIQSON, et al. Consciência situacional, tomada de decisão e modos de controle cognitivo em ambientes complexos. **Production**, v. 19, n. 3, p. 433–444, 2009.
- HENSELER, J.; HUBONA, G.; RAY, P. A. Using PLS path modeling in new technology research: Updated guidelines. **Industrial Management and Data Systems**, 2016. ISSN 02635577.
- HETTINGER, L. J. et al. Modelling and simulation of complex sociotechnical systems: envisioning and analysing work environments. **Ergonomics**, v. 58, n. 4, p. 600–614, 2015. ISSN 13665847.
- HIDALGO, R. B.; SHEEHAN, D. V. **Generalized anxiety disorder**. 2012. 343–62 p. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22728647>>.
- HILLIARD, A.; JAMIESON, G. A. Representing energy efficiency diagnosis strategies in cognitive work analysis. **Applied Ergonomics**, v. 59, p. 602–611, 2017. ISSN 18729126.
- HOBBS, A.; REASON, J. **Managing Maintenance Error: A practical guide**. Ashgate, 2003. 183 p. ISBN 9780754615910. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=7GQqvafvNAC>>.
- HOBBS, A.; WILLIAMSON, A.; DONGEN, H. P. V. A circadian rhythm in skill-based errors in aviation maintenance. **Chronobiology International**, v. 27, n. 6, p. 1304–1316, 2010. ISSN 07420528.
- HOLLNAGEL, E. **Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)**. [s.n.], 1998. 151–190 p. ISBN 9780080428482. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080428482500063>>.
- HOLLNAGEL, E. **Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)**. [s.n.], 1998. 151–190 p. ISBN 9780080428482. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080428482500063>>.
- HOSSAIN, M. A. et al. Factors affecting OHS practices in private universities: An empirical study from Bangladesh. **Safety Science**, 2015. ISSN 18791042.

- HURVICH, C. M.; TSAI, C. L. Regression and time series model selection in small samples. **Biometrika**, v. 76, n. 2, p. 297–307, 1989. ISSN 00063444.
- ICAO. **Human Factor Digest No.7 Investigation of Human Factors in Accidents and Incidents**. 1993. 60 p. Disponível em: <<https://www.icao.int/safety/airnavigation/ops/pages/flsmanual.aspx>>.
- ICAO. **Factors training**. 1998. 302 p. Disponível em: <<https://www.icao.int/safety/airnavigation/ops/pages/flsmanual.aspx>>.
- IESMANTAS, T.; ALZBUTAS, R. Bayesian Reliability of Gas Network Under Varying Incident Registration Criteria. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 32, n. 5, p. 1903–1912, 7 2016. ISSN 07488017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qre.1921>>.
- IIDA, I.; GUIMARÃES, L. B. d. M. **Ergonomia - Projeto E Producao**. 3a. ed. [S.l.]: Blucher, 216. 850 p. ISBN 9788521209331.
- INODKUMAR, M. N.; BHASI, M. Safety climate factors and its relationship with accidents and personal attributes in the chemical industry. **Safety Science**, 2009. ISSN 09257535.
- ISO 14224. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. **Iso**, v. 2016, p. 982, 2016. ISSN 1945-0257. Disponível em: <<http://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2016/12/ISO-14224-2016.pdf%0Ahttps://www.iso.org/standard/64076.html>>.
- JIANG, S.; KECECIOGLU, D. Maximum likelihood estimates, from censored data, for mixed-Weibull distributions. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 41, p. 248–255, 1992. ISSN 00189529.
- JUKIĆ, D.; BENŠIĆ, M.; SCITOVSKI, R. On the existence of the nonlinear weighted least squares estimate for a three-parameter Weibull distribution. **Computational Statistics and Data Analysis**, v. 52, n. 9, p. 4502–4511, 2008. ISSN 01679473.
- JUKIĆ, D.; BENŠIĆ, M.; SCITOVSKI, R. On the existence of the nonlinear weighted least squares estimate for a three-parameter Weibull distribution. **Computational Statistics and Data Analysis**, v. 52, n. 9, p. 4502–4511, 2008. ISSN 01679473.
- KAFETZOPOULOS, D. P.; PSOMAS, E. L.; GOTZAMANI, K. D. The impact of quality management systems on the performance of manufacturing firms. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2015. ISSN 0265671X.
- KECECIOGLU, D. B. **Reliability & Life Testing Handbook, Vol 1 (Revised Edition)**. [S.l.]: DEStech Publications, Inc., 2002. 941 p. ISBN 978-1932078022.
- KHOSHGOFTAAR, T. M.; WOODCOCK, T. G. Software reliability model selection: a cast study. In: **Proceedings. 1991 International Symposium on Software Reliability Engineering**. IEEE Comput. Soc. Press, 1991. v. 8, p. 183–191. ISBN 0-8186-2143-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/145378/>>.
- KIM, Y.; PARK, J.; JUNG, W. A classification scheme of erroneous behaviors for human error probability estimations based on simulator data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 163, 2017. ISSN 09518320.

- KIM, Y. et al. A statistical approach to estimating effects of performance shaping factors on human error probabilities of soft controls. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 142, p. 378–387, 2015. ISSN 09518320.
- KIM, Y. et al. Estimating the quantitative relation between PSFs and HEPs from full-scope simulator data. **Reliability Engineering and System Safety**, Elsevier Ltd, v. 173, p. 12–22, 2018. ISSN 09518320. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.01.001>>.
- KIRWAN, B. The validation of three human reliability Quantification techniques - THERP, HEART and JHEDI: Part III - practical aspects of the usage of the techniques. **Applied Ergonomics**, v. 28, n. 1, p. 27–39, 1997. ISSN 00036870.
- KIRWAN, B.; AINSWORTH, L. K. **A guide to task analysis**. [s.n.], 1992. 417 p. ISBN 0748400583. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+Guide+to+task+analysis#0>>.
- KIRWAN, B.; GIBSON, W. H.; HICKLING, B. Human error data collection as a precursor to the development of a human reliability assessment capability in air traffic management. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 2, p. 217–233, 2008. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832006002754>>.
- KIVIMÄKI, M. et al. Organisational downsizing and increased use of psychotropic drugs among employees who remain in employment. **Journal of epidemiology and community health**, v. 61, n. 2, p. 154–158, 2007. ISSN 0143-005X.
- KORKMAZ, M. et al. The Topp-Leone generalized odd log-logistic family of distributions: properties, characterizations and applications. **Communications Faculty Of Science University of Ankara Series A1Mathematics and Statistics**, 2019. ISSN 1303-5991.
- KUMAR, V. N. A.; GANDHI, M. S.; GANDHI, O. P. Identification and assessment of factors influencing human reliability in maintenance using fuzzy cognitive maps. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 31, n. 2, p. 169–181, 2015. ISSN 10991638.
- KUMAR, V. N. A.; GANDHI, O. P. Quantification of human error in maintenance using graph theory and matrix approach. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 27, n. 8, p. 1145–1172, 2011. ISSN 07488017.
- LASSALLE, M.; CHASTANG, J. F.; NIEDHAMMER, I. Working conditions and psychotropic drug use: Cross-sectional and prospective results from the French national SIP study. **Journal of Psychiatric Research**, Elsevier Ltd, v. 63, p. 50–57, 2015. ISSN 18791379. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022395615000631>>.
- LAWLESS, J. F. **Statistical Models and Methods for Lifetime Data**. 2nd. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2003. 630 p.
- LEE, J. D.; CASSANO-PINCHE, A.; VICENTE, K. J. Bibliometric Analysis of Human Factors (1970 –2000): A Quantitative Description of Scientific Impact. **Human Factors**, v. 47, n. 4, p. 753–766, 2005.

LEE, S. J.; KIM, J.; JUNG, W. Quantitative estimation of the human error probability during soft control operations. **Annals of Nuclear Energy**, v. 57, p. 318–326, 2013. ISSN 03064549.

LIGINLAL, D.; OW, T. T. Modeling attitude to risk in human decision processes: An application of fuzzy measures. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 157, n. 23, p. 3040–3054, 12 2006. ISSN 01650114. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165011406002612>>.

LIN, Q.-L. et al. Human reliability assessment for medical devices based on failure mode and effects analysis and fuzzy linguistic theory. **Safety Science**, v. 62, p. 248–256, 2014. ISSN 09257535.

LINDQVIST, B. H. On the Statistical Modeling and Analysis of Repairable Systems. **Statistical Science**, v. 21, n. 4, p. 532–551, 11 2006. ISSN 0883-4237.

LORENZO, D. **American institute petroleum API publication 770 - A management guide to reduce human errors - improving human performance in process industries Api 770**. 2001.

LOUIT, D. M.; PASCUAL, R.; JARDINE, A. K. S. A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, n. 10, p. 1618–1628, 2009. ISSN 09518320.

LOWRY, P. B.; GASKIN, J. Partial least squares (PLS) structural equation modeling (SEM) for building and testing behavioral causal theory: When to choose it and how to use it. **IEEE Transactions on Professional Communication**, 2014. ISSN 03611434.

LUIS, A.; FREITAS, P. A avaliação da confiabilidade de questionários: uma análise utilizando o coeficiente alfa de Cronbach Sustainable urban mobility View project Reseach and studies in Quality of Working Life in service companies View project. n. January, 2005. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/236036099>>.

MANZANI, Y. E.; SIDMOU, M. L.; CEGARRA, J. j. Does ISO 9001 quality management system support product innovation? An analysis from the sociotechnical systems theory. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2019. ISSN 0265671X.

MARTINS, M. R.; MATURANA, M. C. Application of Bayesian Belief networks to the human reliability analysis of an oil tanker operation focusing on collision accidents. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 110, p. 89–109, 2013. ISSN 09518320.

MAULE HG. Productivity and Social Organization: The Ahmedabad Experiment. **British Journal of Industrial Medicine**, v. 15, n. 4, p. 302, 1958. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1037941/?page=1>>.

MCCAUGHEY, D. et al. Examining workplace hazard perceptions & employee outcomes in the long-term care industry. **Safety Science**, 2015. ISSN 18791042.

MCKONE, K. E.; SCHROEDER, R. G.; CUA, K. O. Impact of total productive maintenance practices on manufacturing performance. **Journal of Operations Management**, 2001. ISSN 02726963.

- MELLAT-PARAST, M. Convergence theory in quality management: Evidence from the petroleum industry. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2013. ISSN 0265671X.
- MENÉZES, R. D. C. S.; DROGUETT, E. L. Análise da confiabilidade humana via redes Bayesianas: uma aplicação à manutenção de linhas de transmissão. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 162–185, 4 2007. ISSN 0103-6513. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132007000100012&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.
- MEYER, P.; BOT, P. L.; PESME, H. MERMOS: An extended second generation HRA method. In: **IEEE Conference on Human Factors and Power Plants**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 276–283. ISBN 1424403065.
- MITRA, J.; XU, X. Composite system reliability analysis using particle swarm optimization. **2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2010**, n. June 2015, p. 548–552, 2010.
- MKRTCHYAN, L.; PODOFILLINI, L.; DANG, V. Bayesian belief networks for human reliability analysis: A review of applications and gaps. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 139, p. 1–16, 2015. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832015000514>>.
- MKRTCHYAN, L.; PODOFILLINI, L.; DANG, V. N. Methods for building Conditional Probability Tables of Bayesian Belief Networks from limited judgment: An evaluation for Human Reliability Application. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 151, p. 93–112, 2016. ISSN 09518320.
- MODGIL, S.; SHARMA, S. Total productive maintenance, total quality management and operational performance An empirical study of Indian pharmaceutical industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2016. ISSN 13552511.
- MOHAMMADFAM, I. et al. Constructing a Bayesian network model for improving safety behavior of employees at workplaces. **Applied Ergonomics**, v. 58, p. 35–47, 2017. ISSN 18729126.
- MONTANI, S.; PORTINALE, L.; BOBBIO, A. Dynamic Bayesian networks for modeling advanced fault tree features in dependability analysis. **Proceedings of the 16th European Conference on Safety and Reliability, Leiden, The Netherlands, AA Balkema**, n. September 2015, p. 1415–1422, 2005. ISSN 0415383420. Disponível em: <<http://people.unipmn.it/stefania/papers-pdf/C45.pdf>>.
- MONTORO, L. et al. Perceived safety and attributed value as predictors of the intention to use autonomous vehicles: A national study with Spanish drivers. **Safety Science**, 2019. ISSN 18791042.
- MOSLEH, a.; CHANG, Y. Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 83, n. 2, p. 241–253, 2 2004. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832003002102>>.

MURTHY, D. N. P.; BULMER, M.; ECCLESTON, J. A. Weibull model selection for reliability modelling. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 86, n. 3, p. 257–267, 2004. ISSN 09518320.

MURTHY, D. N. P.; BULMER, M.; ECCLESTON, J. A. Weibull model selection for reliability modelling. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 86, n. 3, p. 257–267, 2004.

NAN, C.; SANSAVINI, G. Developing an agent-based hierarchical modeling approach to assess human performance of infrastructure systems. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 53, p. 340–354, 2016. ISSN 18728219.

NYKÄNEN, M. et al. Safety self-efficacy and internal locus of control as mediators of safety motivation – Randomized controlled trial (RCT) study. **Safety Science**, 2019. ISSN 18791042.

OOSTHUIZEN, R.; PRETORIUS, L. Establishing a methodology to develop complex sociotechnical systems. In: **Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1477–1482. ISBN 9781467345699.

O'HARA, J. C. H. J. M.; FLEGER, P. A. P. S. A. **NUREG-0711, Rev. 3 Human factors engineering program review model**. [s.n.], 2004. 147 p. Disponível em: <<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA488603>>.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia**. Tradução d. São Paulo: Blucher, 2005. 411 p. ISBN 9788521215516.

PAIVA, B. S.; SANTOS, I. J. A. L. METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DOS OPERADORES DE SALAS DE CONTROLE DE PLANTAS NUCLEARES , EM SITUAÇÕES DE emergência. In: **INAC – International Nuclear Atlantic Conference, ABEN- Associação Brasileira de Energia Nuclear**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. ISBN 9788599141038.

PALLEROSI CARLOS A., M. B. P. M. M. L. R. **Confiabilidade Humana conceitos, análises, avaliação e desafios**. 1a. ed. Ribeirão Pires: All Print editores, 2011. 360 p. ISBN 978-85-7718-983-0.

PAN, X.; XIN, Z.; LI, G. Organizational reliability capability assessment: A case study in china r&d enterprise for aviation products. **IEEE Transactions on Reliability**, 2015. ISSN 00189529.

PARK, J. et al. A guideline to HRA data collection from simulations. **International Journal of Performability Engineering**, v. 10, n. 7, p. 729–740, 2014. ISSN 09731318.

PARK, J. et al. Estimating the response times of human operators working in the main control room of nuclear power plants based on the context of a seismic event - A case study. **Annals of Nuclear Energy**, Elsevier Ltd, v. 85, p. 36–46, 2015. ISSN 18732100. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.03.053>>.

PARK, K. S.; LEE, J. i. A new method for estimating human error probabilities: AHP-SLIM. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, n. 4, p. 578–587, 2008. ISSN 09518320.

PASQUALE, V. D. et al. A Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA). **Reliability Engineering & System Safety**, v. 139, p. 17–32, 2015. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832015000484>>.

PENG, K. F.; FAN, Y. W.; HSU, T. A. **Proposing the content perception theory for the online content industry - A structural equation modeling**. 2004.

PENG, X.; YAN, Z. Estimation and application for a new extended Weibull distribution. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 121, p. 34–42, 2014.

PHILLIPS L.D., H. P. E. D. E. & S. D. L. A Socio-technical Approach to Assessing Human Reliability. In: OLIVER, J. Q. S. R. M. (Ed.). **Influence Diagrams, Belief Nets and Decision Analysis**. 1. ed. [S.l.]: Wylley, 1990. cap. PROBLEMS A, p. 22. ISBN 978-0-471-92381-7.

PHOGAT, S.; GUPTA, A. K. Development of framework for just-in-time implementation in maintenance: An ISM-MICMAC approach. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2018. ISSN 13552511.

PHOGAT, S.; GUPTA, A. K. Evaluating the elements of just in time (JIT) for implementation in maintenance by exploratory and confirmatory factor analysis. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2019. ISSN 0265671X.

PODOFILLINI, L.; DANG, V. N. A Bayesian approach to treat expert-elicited probabilities in human reliability analysis model construction. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 117, p. 52–64, 2013. ISSN 09518320.

POSSOLO, A. Copulas for uncertainty analysis. **Metrologia**, v. 47, n. 3, p. 262–271, 2010.

PRASAD, P. V. N.; M., R. K. R. Reliability Models of Repairable Systems Considering the Effect of Operating Conditions. In: **Annual reliability and maintainability symposium**. [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 0780373480.

PRATAVIERA, F. et al. A new generalized odd log-logistic flexible Weibull regression model with applications in repairable systems. **Reliability Engineering and System Safety**, 2018. ISSN 09518320.

PREISCHL, W.; HELLMICH, M. Human error probabilities from operational experience of German nuclear power plants. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 109, p. 150–159, 2013. ISSN 09518320.

PRVAKOVA, S.; DANG, V. A review of the current status of HRA data. In: **Safety, Reliability and Risk Analysis**. CRC Press, 2013. p. 595–603. ISBN 9781138001237. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b15938-92>>.

RANDHAWA, J. S.; AHUJA, I. S. Structural equation modeling for validating impact of 5S implementation on business excellence of manufacturing organizations. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2017. ISSN 0265671X.

RASMUSSEN, M.; STANDAL, M. I.; LAUMANN, K. Task complexity as a performance shaping factor: A review and recommendations in Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis (SPAR-H) adaption. **Safety Science**, v. 76, p. 228–238, 2015. ISSN 18791042.

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121–132, 1998. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832098830056>>.

RAUSAND, M. 12 Barriers and barrier analysis. In: **Risk Assessment Theory, Methods and Applications**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 363–407. ISBN 9781118281116.

RAUSAND, M.; HSYLAND, A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. **Wescon/96**, 2004. ISSN 1095-791X. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470316900.fmatter/pdf>>.

RAUSAND, M.; HSYLAND, A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. **Wescon/96**, 2004. ISSN 1095-791X.

RAUSAND, M.; ØIEN, K. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 53, n. 1, p. 73–83, 1996. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0951832096000105>>.

READ, G. J. et al. Designing sociotechnical systems with cognitive work analysis: putting theory back into practice. **Ergonomics**, v. 58, n. 5, p. 822–851, 2015. ISSN 13665847.

REASON, J. **Human error**. [s.n.], 1990. 1056–1057 p. ISSN 0521314194. ISBN 0-521-30669-8. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=psyh&AN=1991-97559-000&site=eds-live%5Cnhttp://homepages.rpiscrews.us/~grayw/pubs/papers/1993/humerror/HumError.pdf>>.

RENATO, P.; FIRMINO, A.; DROGUETT, E. L. A ANÁLISE CONFIABILIDADE HUMANA: UMA REVISÃO COMENTADA DA LITERATURA. In: **XLII sbpo 30/08**. [S.l.: s.n.], 2008.

RIBEIRO, A. C. et al. Human reliability analysis of the Tokai-Mura accident through a THERP-CREAM and expert opinion auditing approach. **Safety Science**, v. 87, p. 269–279, 2016. ISSN 18791042.

RICE, A. K. **Productivity and social organization : the Ahmedabad experiment; technical innovation, work organization, and management**. [s.n.], 1970. 298p p. ISBN 0422750700. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=iR1UAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Productivity+and+social+organization+:+the+Ahmedabad+experiment%3B+technical+innovation,+work+organization,+and+management&ots=q7bjx4qmg1&sig=D-A8RJeDwYoIvdZIEXcpVaoS_y0#v=one>.

RINGLE, C. M. et al. Partial least squares structural equation modeling in HRM research. **International Journal of Human Resource Management**, 2018. ISSN 14664399.

RINGLE, C. M.; SILVA, D. D.; BIDO, D. D. S. Modelagem de Equações Estruturais com Utilização do Smartpls. **Revista Brasileira de Marketing**, 2014. ISSN 2177-5184.

- RINGLE CHRISTIAN M., W. S.; BECKER, J. **SmartPLS 3 (v. 3.2.8)**. 2015. Disponível em: <<http://www.smartpls.com>>.
- RIPOLL, L. H.; TRIEBWASSER, J.; SIEVER, L. J. Evidence-based pharmacotherapy of personality disorders. In: **Essential Evidence-Based Psychopharmacology, Second Edition**. [S.l.]: Cambridge Medicine, 2012. p. 278–315. ISBN 9780511910395.
- ROBERTSON, M. M. et al. Sociotechnical approaches to workplace safety: Research needs and opportunities. **Ergonomics**, v. 58, n. 4, p. 650–658, 2015. ISSN 13665847.
- ROBLES, J. Confirmation bias in structural equation modeling. **Structural Equation Modeling**, 1996. ISSN 10705511.
- RONG, H.; TIAN, J. STAMP-Based HRA Considering Causality Within a Sociotechnical System: A Case of Minuteman III Missile Accident. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, 2014. ISSN 0018-7208. Disponível em: <<http://hfs.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0018720814551555>>.
- RONG, H.; TIAN, J. STAMP-Based HRA Considering Causality Within a Sociotechnical System: A Case of Minuteman III Missile Accident. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, 2014. ISSN 0018-7208. Disponível em: <<http://hfs.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0018720814551555>>.
- RONG, H.; TIAN, J. STAMP-Based HRA Considering Causality Within a Sociotechnical System: A Case of Minuteman III Missile Accident. **Human factors**, v. 57, n. 3, p. 375–96, 5 2015. ISSN 0018-7208.
- SÁNCHEZ FRANCISCO JOSÉ SARABIA, S. M. Validez y fiabilidad de escalas. In: PIRÁMIDE, E. (Ed.). **Metodología para la investigación en marketing y dirección de empresas**. Madrid: Ediciones Pirámide, 1999. cap. Validez y, p. 363–393. ISBN 978-84-368-1342-5.
- SANTANA, D. D. et al. A novel Bayesian approach for reliability modeling : The benefits of uncertainty evaluation in the model selection procedure. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 34, n. March, p. 1–15, 2018. ISSN 07488017.
- SHETH, A.; ANANTHARAM, P.; HENSON, C. Semantic, cognitive, and perceptual computing: Paradigms that shape human experience. **Computer**, v. 49, n. 3, p. 64–72, 2016. ISSN 00189162.
- SHIRLEY, R. B. et al. Validating THERP: Assessing the scope of a full-scale validation of the Technique for Human Error Rate Prediction. **Annals of Nuclear Energy**, v. 77, p. 194–211, 2015. ISSN 18732100.
- SILVA, J.; MENEGON, N.; CARVALHO, M. d. CONFIABILIDADE HUMANA: REVISÃO DE LITERATURA NA PERSPECTIVA DA ERGONOMIA. **abepro.org.br**, 2009. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_094_637_14055.pdf>.
- SILVA, J. A. P.; MENEGON, N. L.; CARVALHO, M. M. de. Human reliability and ergonomics: a literature review from 1963 to 2011. **Work (Reading, Mass.)**, v. 41 Suppl 1, p. 3252–9, 1 2012. ISSN 1875-9270. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22317213>>.

SINGH, S.; KUMAR, R.; KUMAR, U. Modelling factors affecting human operator failure probability in railway maintenance tasks: an ISM-based analysis. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**, v. 6, n. 2, p. 129 – 138, 2015. ISSN 09764348.

SMITH, T. D.; ELDRIDGE, F.; DEJOY, D. M. Safety-specific transformational and passive leadership influences on firefighter safety climate perceptions and safety behavior outcomes. **Safety Science**, 2016. ISSN 18791042.

SO, R. H. Y.; LAM, S. T. Factors affecting the appreciation generated through applying human factors/ergonomics (HFE) principles to systems of work. **Applied Ergonomics**, v. 45, p. 99–109, 2014. ISSN 00036870.

SONY, M.; NAIK, S. Six Sigma, organizational learning and innovation: An integration and empirical examination. **International Journal of Quality and Reliability Management**, 2012. ISSN 0265671X.

SPURGIN, A. J. **Human Reliability Assessment Theory and Practice**. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 1420068520.

SPURGIN, A. J. **Human Reliability Assessment Theory and Practice**. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 1420068520.

STAHL, S. M. Overview of trends in modern psychopharmacology. **CNS Spectrums**, v. 12, n. 2, p. 103–105, 2007. ISSN 1092-8529. Disponível em: <<http://proxy.lib.ohio-state.edu/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=psyh&AN=2007-04457-003&site=ehost-live>>.

STANTON, N. et al. **Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods**. [S.l.]: CRC Press, 2005. 764 p. ISBN 0203489926.

STANTON, N. et al. **Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods**. [S.l.: s.n.], 2005. 764 p. ISBN 0203489926.

STANTON, N.; SALMON, P. Human Factors Design & Evaluation Methods Review. **Human Factors Integration Defence Technology Centre**, n. 1, 2004.

STEVENS, P. **Reliability, Maintainability and Risk. Practical Methods for Engineers (4th edition)**. 1993. 257 p.

STRÄTER, O. Considerations on the elements of quantifying human reliability. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 83, n. 2, p. 255–264, 2 2004. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832003002114>>.

STRAUCH, B. Can Cultural Differences Lead to Accidents? Team Cultural Differences and Sociotechnical System Operations. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, v. 52, n. 2, p. 246–263, 4 2010. ISSN 0018-7208. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720810362238>>.

SU, X. et al. Inclusion of task dependence in human reliability analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 128, p. 41–55, 2014. ISSN 09518320.

SUN, Z. et al. Estimating Human Error Probability using a modified CREAM. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 100, p. 28–32, 2012. ISSN 09518320.

SUN, Z. et al. Estimating Human Error Probability using a modified CREAM. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 100, p. 28–32, 2012. ISSN 09518320.

SWAIN, a. D.; GUTTMANN, H. E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plan. n. August, p. 728, 1983. Disponível em: <<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCIQFjAA&url=http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0712/ML071210299.pdf&ei=YXnGU6ToAZDKsQS5-4Ag&usg=AFQjCNHonQM2JNafDoucSGycfn3qWGyPbA&sig2=8dVSTh28-RRLd1mWEwaZhw&bvm>>.

SWAIN, a. D.; GUTTMANN, H. E. **Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plan**. [S.l.], 1983. 728 p. Disponível em: <<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCIQFjAA&url=http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0712/ML071210299.pdf&ei=YXnGU6ToAZDKsQS5-4Ag&usg=AFQjCNHonQM2JNafDoucSGycfn3qWGyPbA&sig2=8dVSTh28-RRLd1mWEwaZhw&bvm>>.

SZWARCMAN, D. M. et al. A fuzzy system for the assessment of human reliability. In: **2009 International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic and Technology Conference, IFSA-EUSFLAT 2009 - Proceedings**. [s.n.], 2009. p. 1102–1107. ISBN 9789899507968. Disponível em: <http://www.eusflat.org/proceedings/IFSA-EUSFLAT_2009/pdf/tema_1102.pdf>.

TABRI, N.; ELLIOTT, C. M. Principles and Practice of Structural Equation Modeling. **Canadian Graduate Journal of Sociology and Criminology**, 2012. ISSN 1927-9825.

TRAN, T. Q. et al. Extracting and converting quantitative data into human error probabilities. **2007 IEEE 8th Human Factors and Power Plants and HPRCT 13th Annual Meeting**, Ieee, n. 1, p. 164–169, 8 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4413200>>.

TRIST, E. **The Evolution of socio-technical systems**. 1981. 1–67 p.

TRIST, E.; BAUMFORTH, K. **Some social and psychological consequences of the longwall method of coal getting**. 1951. 7–9 p.

TRUCCO, P. et al. A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 6, p. 845–856, 6 2008. ISSN 09518320. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832007001214>>.

TRUMBO, C. W. Heuristic-systematic information processing and risk judgment. **Risk Analysis**, 1999. ISSN 02724332.

UPADHYAY, S. K.; VASISHTA, N.; SMITH, A. F. M. Bayes Inference in Life Testing and Reliability via Markov Chain Monte Carlo Simulation. **Sankhy** $\overline{\text{a}}$: **The Indian Journal of Statistics**, v. 62, n. 2, p. 203–222, 2000.

VAINIO, A.; PALONIEMI, R.; VARHO, V. Weighing the Risks of Nuclear Energy and Climate Change: Trust in Different Information Sources, Perceived Risks, and Willingness to Pay for Alternatives to Nuclear Power. **Risk Analysis**, 2017. ISSN 15396924.

WANG, Y.; RAUSAND, M. Reliability analysis of safety-instrumented systems operated in high-demand mode. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 32, p. 254–264, 2014. ISSN 09504230.

WECKMAN, G. R.; SHELL, R. L.; MARVEL, J. H. Modeling the reliability of repairable systems in the aviation industry. **Computers and Industrial Engineering**, v. 40, n. 1-2, p. 51–63, 2001. ISSN 03608352.

WEERDT, C. V. D.; BARATTA, R. Changes in working conditions for home healthcare workers and impacts on their work activity and on their emotions. **Production**, v. 25, n. 2, p. 344–353, 2015. ISSN 1980-5411. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132015000200344&lng=en&nrm=iso&tlng=en>.

WU, S. et al. Reliability assessment for final elements of SISs with time dependent failures. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 51, p. 186–199, 2018. ISSN 09504230.

YANG, Z. L. et al. A modified CREAM to human reliability quantification in marine engineering. **Ocean Engineering**, v. 58, p. 293–303, 2013. ISSN 00298018.

ZAREI, E. et al. Efficiency prediction of control room operators based on human reliability analysis and dynamic decision-making style in the process industry. **Process Safety Progress**, v. 35, n. 2, p. 192–199, 2016. ISSN 15475913.

ZHANG, G.; THAI, V. V. **Expert elicitation and Bayesian Network modeling for shipping accidents: A literature review**. 2016.

ZHANG, L. F.; XIE, M.; TANG, L. C. A study of two estimation approaches for parameters of Weibull distribution based on WPP. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 92, n. 3, p. 360–368, 2007. ISSN 09518320.

ZHANG, T.; DWIGHT, R. Choosing an optimal model for failure data analysis by graphical approach. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 115, p. 111–123, 2013.

ZWIRGLMAIER, K.; STRAUB, D.; GROTH, K. M. Capturing cognitive causal paths in human reliability analysis with Bayesian network models. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 158, p. 117–129, 2017. ISSN 09518320.

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>

