**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**
**ESCOLA DE ENGENHARIA**
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MANUEL PEREIRA DO NASCIMENTO NETO**

# PROPOSIÇÃO DE UMA SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE HUMANA EM MINA A CÉU ABERTO

**PORTO ALEGRE**
**2014**

**MANUEL PEREIRA DO NASCIMENTO NETO**

# PROPOSIÇÃO DE UMA SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE HUMANA EM MINA A CÉU ABERTO

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de Engenharia de Produção.**

**Orientador: Michel José Anzanello, Ph.D.**

**PORTO ALEGRE**
**2014**

**MANUEL PEREIRA DO NASCIMENTO NETO**

# PROPOSIÇÃO DE UMA SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE HUMANA EM MINA A CÉU ABERTO

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Michel José Anzanello, PhD.
Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Coordenador PPGEP/UFRGS

BANCA EXAMINADORA:

Herbert Ricardo Garcia Viana, Dr. (VALE S.A)

José Luis Duarte Ribeiro, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Eunirio Zanetti Fernandes, Dr. (VALE S.A)

*Dedico esta tese à minha esposa **Carla** e aos meus dois filhos, **André** e **Danilo,** aos quais serei grato para sempre pelo apoio, compreensão, dedicação e incentivo. **Vocês** são bênçãos de **Deus** em minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o autor da vida, por me dar saúde, sabedoria e permitir que eu concluísse este doutorado.

Sou muitíssimo grato ao meu orientador, Prof. Dr. Michel José Anzanello, pela atenção, dedicação, paciência e valorosas contribuições permitindo a elaboração e conclusão desta tese. A você Professor, meu muito obrigado mesmo. Sem você este projeto não teria existido.

Dedico a minha gratidão aos meus pais, Paulo e Maria *in memoriam*, que por uma vida de dedicação, amor e trabalho, sempre possibilitaram a seus filhos a oportunidade de realizar sonhos e conquistas.

Sou grato à fiel esposa Carla e aos meus filhos André e Danilo por compreenderem a minha ausência e a pouca atenção dedicada nesse período.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção pelo apoio e pelas críticas construtivas resultando em grande contribuição para a minha formação.

À VALE, empresa que aprendi a admirar, que acreditou na viabilidade e financiou este projeto, meu muito obrigado de coração.

Sou grato ainda a todos os especialistas que participaram da pesquisa, cujas informações foram fundamentais para a construção desta tese. Aos servidores da UFRGS e a Escola de Engenharia pela atenção, acolhimento e dedicação dispensada.

A todos que de uma forma ou de outra contribuíram para esta caminhada, muito obrigado.

# RESUMO

Esta tese apresenta uma sistemática para avaliação de confiabilidade humana em mina a céu aberto com vistas à proposição de planos de melhorias para tratativa de falhas humanas. Para tanto, gera-se uma metodologia apoiada na seleção de especialistas para preenchimento da tabela de Análise de Modos e Efeitos de falha (FMEA). A utilização dos especialistas mais consistentes eleva a qualidade e a consistência das avaliações, possibilitando maior coerência das informações, desconsiderando opiniões extremistas e permitindo proposição de melhorias mais assertivas. Além do preenchimento dos índices de Ocorrência, Detecção e Severidade, tradicionalmente existentes na FMEA, propõe-se a utilização do índice de Severidade Humana (SH), que visa quantificar o impacto de cada modo de falha sobre a integridade física dos colaboradores vinculados ao processo em que a falha ocorre. A ocorrência de tais falhas pode gerar acidentes que demandam atendimentos ambulatoriais, afastamentos, fatalidades ou perdas produtivas substanciais. A elaboração dos planos de melhoria dos modos de falha preponderantes é operacionalizada em duas frentes, de acordo com a disponibilidade de tempos até a falha motivados por erros humanos. Mediante número suficiente de tempos até a falha, realiza-se uma modelagem quantitativa com vistas à determinação de intervalos de checagem dos procedimentos associados aos modos de falha preponderantes; além da definição de tal intervalo, gera-se um plano de melhorias para cada modo de falha. No caso de não haver número suficiente de tempos até a falha para modelagem quantitativa, gera-se somente o plano de melhoria para o modo de falha em questão. Os planos de melhorias propostos são focados em comportamentos que tenham relação com aspectos cognitivos (percepção, atenção, memória, raciocínio, juízo, imaginação, pensamento, linguagem, etc.) e sócio-emocionais (autonomia, estabilidade emocional, sociabilidade, capacidade de superar fracassos, curiosidade, perseverança, etc.), os quais impactam na execução dos procedimentos e podem conduzir a falhas.



**Palavras-chave**: Confiabilidade Humana, Falhas Humanas, Seleção de Especialistas, FMEA.

**ABSTRACT**

This thesis presents a system for evaluating human reliability in open pit mine aimed at proposing improvements plans derived from human errors. Therefore, it proposes a methodology that relies on the selection of experts to assess the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Using the most consistent experts increases the quality and consistency of assessments, enabling more coherence on experts' opinions, disregarding extremist views and allowing more assertive proposition improvements. In addition to the traditional FMEA indices, i.e. Occurrence rates, Detection and Severity, we propose the Human Severity Index (SH), which aims to quantify the impact of each failure mode upon the physical integrity of employees. The occurrence of such failures can lead to accidents that require outpatient care, absenteeism, fatalities or substantial production losses. The development of improvement plans predominant failure modes is carried out in two fronts, according to the availability of failure times samples motivated by human error. When enough time to failure samples are available, we carry out a quantitative modeling to determine checking intervals for procedures associated with the predominant failure modes; next, an improvement plan for each failure mode is proposed. In case there is no sufficient number of times to failure for quantitative modeling, we generate only the improvement plan for the failure mode in question. The proposed improvement plans are focused on behaviors are related to cognitive (perception, attention, memory, reasoning, judgment, imagination, thought, language, etc.) and socio-emotional (autonomy, emotional stability, sociability, ability to overcome failures , curiosity, perseverance, etc.) aspects.

Keywords: Human Reliability, Human Failure, Expert Selection, FMEA.

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Planilha FMEA para ER 151K-01 com modos de falhas Mecânicas preenchida por um dos especialistas..... 87

Apêndice B - Planilha FMEA para ER 151K-01 com modos de falhas Elétricas preenchida por um dos especialistas..... 90

Apêndice C - Tabela de probabilidade dos índices de Detecção, Ocorrência, Severidade e Severidade Humana utilizados no preenchimento da FMEA..... 92

Apêndice D - Tabela com cálculos dos RPNs>100 para modos de falhas mecânicas..... 93

Apêndice E – Tabela com cálculos dos RPNs>100 para modos de falhas Elétricas..... 94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Função Confiabilidade R(t) ..... 45
Figura 2 - Empilhadeira e Recuperadora ER 151K-01 ..... 47
Figura 3 - Falhas Ocorridas na ER 151K-01 no Período de Jan a Set/13 ..... 47
Figura 4 - Perfil de Perdas da Expedição da Usina 1 no Período de Jan a Set/13 ..... 48
Figura 5 - Testes de Aderência para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional) ..... 50
Figura 6 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional) ..... 51
Figura 7 - Função de Confiabilidade (R(t)) para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional) ..... 51
Figura 8 - Determinação da Confiabilidade para 85% - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional) ..... 52
Figura 9 - Testes de Aderência para Falha Mecânica - Quebra de Rolete (Limpeza Inadequada) ..... 55
Figura 10 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Mecânica - Quebra de Rolete (limpeza inadequada) ..... 56
Figura 11- Função de Confiabilidade (R(t)) para Falha Mecânica - Quebra de Rolete (limpeza inadequada) ..... 57
Figura 12 - Determinação da Confiabilidade para 85% - Quebra de Rolete (limpeza inadequada) ..... 57
Figura 13 - Testes de Aderência para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e falha na montagem de guias laterais na saída de chutes) ..... 60
Figura 14 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e falha na montagem de guias laterais na saída de chutes) ..... 61
Figura 15 - Função de Confiabilidade (R(t)) para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (Ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e Falha na montagem de guias laterais na saída de chutes) ..... 61
Figura 16 - Determinação da Confiabilidade para 85% - Rasgo da Correia do Transportador (Ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e Falha na montagem de guias laterais na saída de chutes) ..... 62
Figura 17 - Testes de Aderência para Falha Elétrica - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente) ..... 68
Figura 18 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Elétrica – Defeito no circuito de comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente) ..... 69

Figura 19 - Função de Confiabilidade (R(t)) para Falha Elétrica - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente) ..... 69

Figura 20 - Determinação da Confiabilidade para 85% - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente) .... 70

Figura 21 - Testes de Aderência para Falha Elétrica - Curto-Circuito (aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva)..... 72

Figura 22 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Elétrica - Curto-Circuito (aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva) ... 73

Figura 23 - Função de Confiabilidade (R(t)) para Falha Elétrica - Curto-Circuito (aperto das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva)..... 73

Figura 24 - Determinação da Confiabilidade para 85% - Curto-Circuito (aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva). ..... 74

Figura 25 - Tempos necessários para aplicação de ação para tratativa de desvios comportamentais..... 77

Figura 26 - Categorias das ações dos planos de melhorias para modos de falhas modelados e não modelados ..... 78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição de Medidas de Confiabilidade ..... 26
Quadro 2 - Relação entre Distribuições e Medidas de Confiabilidade ..... 27
Quadro 3 - Tabela FMEA ..... 30
Quadro 4 - Escala para avaliação da severidade dos modos de falha proposta por Fogliatto e Ribeiro ..... 31
Quadro 5 - Escala para avaliação da ocorrência em processos proposta por Lafraia ..... 32
Quadro 6 - Escala para avaliação da detecção em processos proposta por Fogliatto e Ribeiro ..... 32
Quadro 7 - Sugestão de escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha para Severidade Humana ..... 40
Quadro 8 - Matriz $Rv$ hipotética ..... 42
Quadro 9 - Matriz $Rv$ para Falhas Mecânicas ..... 49
Quadro 10 - Plano de Melhoria para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador devido à sobrecarga na correia por falha operacional ..... 54
Quadro 11 - Plano de Melhoria para Falha Mecânica - Quebra de Rolete devido à limpeza inadequada ..... 58
Quadro 12 - Plano de Melhoria para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (Ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e Falha na montagem de guias laterais na saída de chutes) ..... 63
Quadro 13 - Plano de Melhoria para Falhas Mecânicas não modeladas com RPN>100 ..... 64
Quadro 14 - Plano de Melhoria para Falhas Mecânicas não modeladas com RPN>100 (continuação) ..... 65
Quadro 15 - Matriz Rv para Falhas Elétricas ..... 67
Quadro 16 - Plano de Melhoria para Falhas Elétricas - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente) ..... 71
Quadro 17 - Plano de Melhoria para Falhas Elétricas - Curto-Circuito causado por aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva ..... 75
Quadro 18 - Plano de Melhoria para Falhas Elétricas não modeladas com RPN>100 ..... 76
Quadro 19 - Número de empregados submetidos à certificação básica ..... 78
Quadro 20 - Número de empregados submetidos à certificação técnica ..... 79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor da produção mineral brasileira comercializada (AMB, 2005) ..... 20
Tabela 2 - Especialistas escolhidos para apontamento dos modos de falhas. ..... 38
Tabela 3 - Lucratividade com redução das perdas ocasionadas por falhas humanas ..... 80

## LISTA DE SIGLAS

AMB - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração

ER - Empilhadeira/Recuperadora

FMEA - (*Failure Mode and Effects Analysis* ou Análise dos Modos e Efeitos de Falha)

GPV-M - (Sistema de Gestão Operacional da Vale no modo Manutenção)

MTTF - Tempo Médio até a Falha

PHP - Modelo de Riscos Proporcionais

PIB - Produto Interno Bruto

$R(t)$ - Função Confiabilidade

ROM - *Run of Mine*

RPN - Número de Prioridade de Risco (Risk Priority Number)

SH - Severidade Humana

SM - Severidade Material

SLIM - Metodologia do Índice de Probabilidade de Sucesso

THERP - Técnica da Taxa de Predição do Erro Humano

$Rv$ - coeficiente de correlação

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO ..... 14**
1.1 Considerações Iniciais ..... 14
1.2 Tema e Objetivos ..... 15
1.2.1 Tema ..... 15
1.2.2 Objetivos ..... 15
1.3 Justificativa do Tema ..... 16
1.4 Método de Trabalho ..... 17
1.5 Estrutura do Trabalho ..... 18
1.6 Delimitações do Trabalho ..... 18
**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 19**
2.1 O Setor de Mineração e a Confiabilidade ..... 19
2.2 Confiabilidade Humana ..... 22
2.2.1 Modelagem quantitativa de falhas humanas ..... 25
2.3. Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) ..... 28
2.4 Seleção de especialistas ..... 36
**3 METODOLOGIA ..... 39**
3.1 Identificar especialistas para preenchimento da FMEA ..... 39
3.2 Preencher parcialmente a FMEA com todos os especialistas ..... 39
3.3 Selecionar os especialistas mais consistentes ..... 41
3.4 Calcular RPN com base nos especialistas selecionados ..... 42
3.5 Modelar quantitativamente os tempos até a falha dos modos preponderantes ..... 43
3.5.1 Coletar tempos até a falha dos modos preponderantes ..... 43
3.5.2 Tratar os dados coletados ..... 43
3.5.3 Modelar os tempos até a falha ..... 44
3.5.4 Determinar intervalos para avaliação da conformidade do modo de execução dos procedimentos analisados ..... 44
3.6 Propor plano de ações de melhorias para os modos de falha preponderantes ..... 45
**4 RESULTADOS ..... 46**
4.1 Falhas Mecânicas ..... 48
4.1.1 Modo de Falha 1 (M1) - Desalinhamento da Correia do Transportador (sobrecarga na correia por falha operacional) ..... 49
4.1.2 Modo de Falha 2 (M2) - Quebra de Rolete (limpeza inadequada) ..... 55

4.1.3 Modo de Falha 3 (M3) - Rasgo da Correia do Transportador (ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção ou falha na montagem de guias laterais na saída de chutes) ..... 59

4.2 Falhas Elétricas ..... 66

4.2.1 Modo de Falha 1 (E1) - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente) ..... 67

4.2.2 Modo de Falha 2 (E2) - Curto Circuito em Motoredutores, Contatores, Circuito de força, Freio e Chave de Emergência devido a aperto inadequado das conexões ou falha no cumprimento da manutenção preventiva ..... 71

**5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES ..... 81**

**REFERÊNCIAS ..... 83**

**APÊNDICES ..... 87**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A globalização criou novos desafios para a permanência das empresas no mercado. Com a concorrência projetando-se em escala mundial, tornou-se necessário o investimento contínuo na redução de custos de mão de obra e de capital. Nesse contexto, os equipamentos passaram a ser dimensionados no limite da necessidade do processo, com faixas operacionais mais estreitas (SIQUEIRA, 2005). O resultado foi um aumento na demanda por sistemas de alto desempenho, que gerou a necessidade da redução da probabilidade de falhas em produtos e processos, levando a uma maior ênfase no estudo da confiabilidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Lafraia (2001) coloca que as empresas têm obtido bons resultados com a aplicação de estudos focados no aumento da confiabilidade de produtos e processos. Segundo o autor, os resultados alcançados incluem redução de paradas de linha, maior flexibilidade para responder às mudanças nas especificações dos produtos e aumento dos níveis de segurança, dentre outros. Segundo Siqueira (2005), o início da utilização do conceito de confiabilidade na indústria deu-se principalmente no setor elétrico. Por conta dos resultados favoráveis alcançados nesse setor, sua adoção expandiu-se para outros setores produtivos, dentre os quais a construção civil, indústrias químicas, de refino e extração de petróleo, indústrias de gás, instalações de bombeamento, siderurgia, celulose, papel, alimentação, mineração, transportes e até hospitais. Ainda segundo Siqueira (2005), devido à generalidade dos conceitos e técnicas utilizados, o estudo da confiabilidade é aplicável a qualquer sistema, independente da tecnologia, em que seja necessário manter a funcionalidade de processos ou ativos físicos.

Alinhado com tal princípio, percebe-se a confiabilidade humana como uma ciência aplicada em vários segmentos da indústria e que se propõe a analisar o erro humano e seu impacto sobre indicadores de produtividade, segurança e qualidade. De tal forma, estabelecem-se estratégias para prevenir, mitigar ou eliminar erros, de maneira a reduzir a ocorrência de acidentes com capital humano e redução da eficiência do processo. Ecay (2007) afirma que acidentes derivados de imperícia ou desatenção de operadores (e suas consequências sobre pessoas e bens) constituem-se em questões não resolvidas na indústria.

Dentre as diversas técnicas para análise de confiabilidade disponíveis na literatura, destaca-se a FMEA (Failure Mode and Effects Analysis ou Análise dos Modos e Efeitos de

Falha). Segundo Layzell e Ledbetter (1998), trata-se de uma ferramenta de análise bastante simples e que tem como objetivo identificar e prevenir falhas em potencial.

Apesar de sua vasta aplicabilidade, é fundamental que o preenchimento da FMEA seja apropriadamente conduzido, sob pena de a ferramenta tornar-se tendenciada e pouco precisa. De tal forma, percebe-se a importância da seleção dos especialistas de processo responsáveis por tal preenchimento, evitando distorções nos pareceres emitidos e consequentes planos de melhorias ineficientes ou equivocados.

Esta tese contribui com a área de confiabilidade através da proposição de uma sistemática estruturada para seleção dos especialistas mais consistentes para preenchimento da FMEA e posterior proposição de melhorias. Para tanto, adéqua a matriz *Rv*, tradicionalmente utilizada na avaliação da consistência de painelistas em análises sensoriais, ao propósito de confiabilidade. O estudo também inova ao propor um quarto índice a ser considerado no preenchimento da FMEA com propósitos de análise de confiabilidade humana: o índice de severidade humana, que endereça a magnitude da ocorrência de falhas sobre o capital humano.

## 1.2 Tema e Objetivos

### 1.2.1 Tema

O tema desta tese é a seleção de especialistas com vistas ao aprimoramento da análise da confiabilidade em uma mina a céu aberto.

### 1.2.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo propor uma sistemática estruturada para avaliação da confiabilidade humana em mina a céu aberto.

São objetivos específicos:

- Desenvolver um novo índice de severidade para a tradicional tabela de FMEA que aborde aspectos de Severidade Humana (SH);
- Iniciar a aplicação de uma sistemática estruturada para seleção dos especialistas mais consistentes no preenchimento da FMEA;

- Modelar quantitativamente tempos até a falha decorrentes de erros humanos, de maneira a sugerir intervalos de checagem na execução de tais procedimentos;
- Propor planos de melhorias focados nos modos de falha decorrentes de erros humanos; e
- Aplicar a sistemática proposta em um processo de mina a céu aberto.

## 1.3 Justificativa do Tema

Com o objetivo de se tornarem mais competitivas, as empresas necessitam que as funções básicas representadas pelos diversos departamentos de sua estrutura apresentem resultados satisfatórios. A manutenção, como função estratégica das organizações e responsável direta pela disponibilidade dos ativos, tem uma importância capital nos resultados de produtividade. Esses resultados serão tanto melhores quanto mais confiáveis e refinados forem os processos. Logo, torna-se fundamental identificar as falhas que impactam no processo produtivo, considerando que estas reduzem a capacidade produtiva e comprometem as metas de produção.

As máquinas de pátio são responsáveis pelo empilhamento e recuperação do material para carregamento de vagões e, consequentemente, expedição do produto. O nível de confiabilidade das mesmas deve ser elevado, considerando que se constituem em gargalos no processo de recuperação. Percebe-se, no entanto, que a quantidade e variedade de falhas apresentadas pelos equipamentos destas instalações têm sido significativas, impactando no cumprimento das metas de expedição. Muitas destas falhas são motivadas por erros de natureza humana (decorrentes de falta de atenção, cansaço, imperícia e imprudência, dentre outros), acarretando falhas em sistemas hidráulicos, de lubrificação, desalinhamento/rasgo de correias transportadoras, desgastes de chutes, desgastes/quebra de rolete, quebra de estrutura da máquina, curtos-circuitos, corrente elétrica alta, defeitos nos circuitos de comando, defeitos em contatores/motores, falhas nos circuitos de comando, dentre outras. Logo, é mandatório avaliar as causas e consequências das falhas humanas no contexto em questão, valendo-se de ferramentas como a FMEA.

Observa-se, no entanto, que a tradicional FMEA não possui um indicador que aborde diretamente a severidade da falha sobre o capital humano, fator esse de fundamental importância no setor de mineração a céu aberto. Desta forma, justifica-se a inclusão de um

índice específico para avaliação de tal severidade. Além disso, entende-se como fundamental que o preenchimento da FMEA seja realizado por especialistas consistentes em suas opiniões acerca dos modos de falha, suas causas, consequência, severidade, frequência, capacidade de detecção e potenciais ações de melhoria. Se isso não acontecer, geram-se inconsistência na hierarquização dos modos de falha e ações de melhorias desencontradas; tal necessidade fornece apoio à seleção de especialistas proposta por este estudo.

A estruturação e sistematização de ferramentas para análise de modos e efeitos de falhas, considerando aspectos de severidade humana e consistência de respondentes para seleção de especialistas mais capacitados ao preenchimento da tabela FMEA, proporcionará uma maior assertividade na identificação e tratamento dos modos de falhas. Espera-se que a sistemática proposta apresente ganhos em produtividade, aumento da confiabilidade e garantia de atendimento à demanda da mina.

## 1.4 Método de trabalho

A pesquisa realizada nesta tese pode ser caracterizada como aplicada em termos de sua natureza, visto que se propõe a gerar conhecimento para aplicações práticas em minas a céu aberto. A abordagem é quantitativa e qualitativa, visto que utiliza ferramentas estatísticas para modelagem de tempos até a falha, além de valer-se da opinião de especialistas para preenchimento da planilha FMEA. Em relação aos objetivos, a pesquisa se caracteriza como exploratória, pois envolve levantamento bibliográfico e análise de casos, o que permite a compreensão dos temas trabalhados.

A sistemática proposta se apoia em seis etapas operacionais, brevemente descritas: ETAPA 1 – nesta etapa são identificados os especialistas para apontamento dos modos de falhas; ETAPA 2 – nesta etapa, todos os respondentes da etapa 1 preenchem a FMEA, incluindo o novo índice de severidade proposto (Severidade Humana), para cada modo de falha listado na etapa anterior; ETAPA 3 – a seleção dos especialistas mais consistentes para finalização do preenchimento da FMEA é realizada através da matriz de correlação $Rv$; ETAPA 4 – nesta etapa é calculado o Número de Prioridade de Risco (Risk Priority Number - RPN) utilizando as medianas dos índices levantados pelos especialistas selecionados; ETAPA 5 – a modelagem quantitativa dos tempos até a falha dos modos preponderantes é realizada com vistas à definição de intervalos de checagem da conformidade dos procedimentos executados pelos operadores; e ETAPA 6 – nesta etapa são propostos planos de ações de melhorias para os modos de falhas decorrentes de erros humanos preponderantes.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

No capítulo 1 são feitas as considerações iniciais acerca do estudo. O mesmo propicia uma visão geral do contexto e da problemática tratada, bem como as motivações para realização do trabalho. Apresentam-se ainda as justificativas e os objetivos do estudo.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, trazendo a fundamentação teórica das ferramentas utilizadas no método. São abordados tópicos acerca do setor de mineração e seus desafios, confiabilidade humana, falhas humanas, FMEA e seleção de especialistas.

No capítulo 3 são apresentados os passos operacionais do método proposto que envolve a identificação dos especialistas para apontamento dos modos de falhas, preenchimento da FMEA para cada modo de falha, seleção de especialistas mais consistentes para finalização do preenchimento da FMEA, calculo do Número de Prioridade de Risco (Risk Priority Number - RPN), modelagem quantitativa dos tempos até a falha dos modos preponderantes e, finalmente são propostos planos de ações de melhorias para os modos de falhas decorrentes de erros humanos.

No capítulo 4 são apresentados, discutidos e analisados os resultados obtidos pela inclusão do novo índice de severidade humana e pela modelagem quantitativa dos tempos até a falha dos modos preponderantes. Neste capítulo também são apresentadas as proposições de planos de melhorias para os modos de falhas humanas preponderantes.

O capítulo 5 resume as principais conclusões do trabalho e apresenta propostas para trabalhos futuros.

## 1.6 Delimitações do Trabalho

A sistemática proposta será aplicada somente na Empilhadeira/Recuperadora (ER 151K-01) localizada no pátio de estocagem e expedição da Usina de Beneficiamento de Minério; não serão considerados outros sistemas ou equipamentos da mina. Também não serão abordados aspectos relacionados a custos e utilização da planta.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma breve revisão sobre o setor de mineração, bem como os fundamentos de confiabilidade humana e FMEA.

## 2.1 O setor de mineração e a confiabilidade

Segundo Ptak (2000), a mineração integra a indústria de processo caracterizada por empreendimentos de grande porte, intensivos em capital, com equipamentos pesados e grandes plantas industriais. Koppe (2007) reporta que o mercado mundial de bens minerais vive um momento de grande crescimento, sendo que a atratividade dos preços das *commodities* e a expansão da economia de diversos países emergentes redundaram em forte subsídio de investimentos na indústria de mineração. O mesmo autor aponta que em vários países há aplicação de investimentos voltados à exploração mineral na procura de novos depósitos minerais e em projetos de empreendimentos mineiros produtivos. Neste contexto, os grandes produtores de bens minerais, como os Estados Unidos, Canadá, Austrália, China, Brasil, Rússia, Índia, Chile e África do Sul, são os maiores beneficiados por essa expansão, sendo que tal tendência deve persistir nos próximos 15 anos.

Koppe (2007) destaca ainda que os principais países que atuam de forma decisiva e participam intensamente do mercado mundial de bens minerais são USA, Canadá, Austrália, África do Sul, Chile, Rússia, China e Índia. Pelo grande desenvolvimento tecnológico, também merecem destaque a Suécia e Finlândia, os quais registraram grandes avanços no planejamento de lavra em larga escala de equipamentos de perfuração, carregamento e de automação.

Neves (2005) corrobora o fato de a atividade mineral ter expressiva participação na economia mundial. O mesmo menciona que no Chile e na Austrália essa participação ultrapassa 20% do Produto Interno Bruto (PIB); já no Brasil, a mineração atingiu 4,5% do PIB, apresentando crescimento significativo. O autor acrescenta que no Brasil há cerca de 2370 minas em operação lavradas a céu aberto, abrangendo uma diversidade de mais de 57 variedades de bens minerais, desde alumínio até zircônio.

De acordo com a classificação do Anuário Mineral Brasileiro (2006), cinco substâncias respondem por aproximadamente 80% de toda produção mineral brasileira. No entanto, ao retirar-se petróleo e gás natural, a relação de substâncias para atingir esse mesmo patamar de produção mineral, considerando-se o valor da produção, sobe para 11: ferro, areia, pedra britada e cascalho, alumínio, ouro, calcário, níquel, água mineral, rocha fosfática,

caulim e carvão mineral, conforme a Tabela 1. O ferro, com produção da ordem de 260 milhões de toneladas/ano, é a principal substância lavrada no Brasil, seguida pelos agregados de construção, areia e brita, com 250 milhões de toneladas/ano.

Tabela 1 - Valor da produção mineral brasileira comercializada (AMB, 2005)

| Substância | R$ |
|---|---|
| Ferro | 7.259.584.317 |
| Areia | 2.435.465.321 |
| Pedras britadas e cascalho | 2.249.079.431 |
| Alumínio | 1.204.538.030 |
| Ouro | 1.122.641.011 |
| Calcário | 1.013.059.046 |
| Níquel | 837.024.528 |
| Água Mineral | 648.558.037 |
| Rocha fosfática | 608.857.156 |
| Caulim | 605.352.136 |
| Carvão mineral | 424.428.761 |
| Subtotal | 18.408.587.774 |
| Total de Produção Nacional | 22.859.833.960 |

Focado nos desafios atualmente enfrentados pelo setor de mineração, Machado (2007) menciona que a inserção mais efetiva do Brasil na mineração globalizada exige atendimento a um elenco de fatores de maior relevância. O autor aponta que o primeiro fator está relacionado à disponibilização de informações geológicas (incluindo dados geofísicos e geoquímicos) confiáveis, as quais possibilitam a atração de empresas de mineração que tenham interesse em desenvolver empreendimentos no país. Para tanto, o autor enfatiza que o Brasil precisa retomar os investimentos em geologia básica.

Em segundo lugar, Machado (2007) aponta que a atração de investimentos internos e externos exige um modelo regulatório eficaz e desburocratizado que ofereça garantias jurídicas, racionalidade e rapidez. O autor também traz a necessidade de evolução da legislação vigente, de modo que exista gestão do patrimônio mineral pela União (conforme reza a constituição), atendendo aos interesses do setor privado (responsável pela incorporação das jazidas ao domínio econômico).

Alinhado a aspectos logísticos, Machado (2007) destaca que a questão relacionada ao transporte do produto ao seu destino se apresenta como um grande desafio. As grandes distâncias entre as nações exportadoras e importadoras dependem de malhas ferroviárias,

rodoviárias e marítimas eficientes, além de demandar aporte de sistemas de informações precisos e confiáveis. O autor aponta ainda que as tendências para a década são promissoras no tocante às exportações brasileiras de bens de origem mineral, sendo intensa a competição com países de forte presença no mercado internacional (principalmente Canadá, China, Rússia, Índia, México e Chile). Tais países, segundo o autor, figuram entre os grandes exportadores de matéria-prima de origem mineral para os três mercados consumidores (América do Norte, União Europeia e Zona do Pacífico).

Machado (2007) aponta ainda que, em alguns casos, as empresas brasileiras necessitarão criar entrepostos nessas regiões para manter estoques junto aos consumidores, além de aprimorar a eficiência dos terminais portuários para garantir a confiabilidade, eficiência e baixo custo da logística dessas exportações.

Mais focado em aspectos de manutenção do sistema de mineração, Bornia (1995), em sua sistemática de análise relacionada ao fenômeno da globalização, aponta que a manutenção na indústria de mineração passa a ser enfocada sob a visão da Gestão de Qualidade e Produtividade. O autor afirma ainda que "atividades auxiliares referem-se ao trabalho que não agrega valor aos produtos, porém é necessário para dar suporte ao trabalho efetivo”. O autor acrescenta ainda que manutenção, preparação de equipamentos, engenharia, planejamento e controle da manutenção fazem parte de uma categoria de atividades de suporte indispensáveis às atividades produtivas.

Por sua vez, Tavares (2005) aponta que empresas brasileiras têm investido intensamente para manter os equipamentos do seu parque produtivo em estado operacional, visto que, sem suporte adequado da atividade de manutenção, a competição torna-se desfavorável. Segundo o autor, a manutenção está diretamente ligada à produtividade dos equipamentos e, assim sendo, merece tratamento especial, pois se torna um quesito de continuidade da linha de produção, sendo benéfico para a empresa. O autor complementa, destacando que a produtividade está ligada à baixa probabilidade da ocorrência de falhas nos equipamentos e processos (ou seja, ser confiável).

Dias (2002) afirma ainda que a confiabilidade está baseada na variável falha, e tem relação direta com diversos aspectos da manutenção. Moura (1999) complementa mencionando que a indústria mineral necessita de elevados níveis de confiabilidade para assegurar os patamares satisfatórios de capacidade de extração, o que implica na necessidade de elevados níveis de disponibilidade do equipamento. O mesmo autor afirma que o aumento

da disponibilidade tem relação direta com o aumento da confiabilidade, redução do tempo de manutenção e da exposição a riscos dos trabalhadores.

## 2.2 Confiabilidade Humana

Segundo Elsayed (1992), Lafraia (2001) e Fogliatto e Ribeiro (2009), confiabilidade é definida como a probabilidade de um produto ou serviço funcionar corretamente sem falhar, durante um período de tempo determinado, sob condições de processo e ambientais definidas. A confiabilidade pode ser considerada a medida de sucesso do sistema (ELSAYED, 1992).

Por sua vez, Maida (1996) define confiabilidade humana como a probabilidade de um sistema que requer ações, tarefas ou trabalhos humanos completar suas atividades com sucesso dentro de um período requerido. Ecay (2007) complementa, afirmando que confiabilidade humana consiste em uma ciência aplicada em vários segmentos da indústria e que se propõe a analisar o erro humano e seu impacto sobre a produtividade, segurança e qualidade; o mesmo autor estabelece estratégias para prevenir, mitigar ou eliminar os erros.

Ecay (2007) aponta que o conhecimento adquirido durante a execução de procedimentos favorece a otimização de rotinas de trabalho e aperfeiçoa o gerenciamento dos recursos humanos. O autor menciona que acidentes e suas consequências sobre pessoas e bens é uma das principais questões não resolvidas na indústria, e que desde o pequeno incidente até a catástrofe há compartilhamento de algo em comum: a falha de integridade técnica e erro humano. O mesmo autor acrescenta que, na busca por melhorias de segurança e produtividade, proteções tradicionais vêm sendo utilizadas, tais como (i) procedimentos operacionais abordando aspectos de segurança, leis, normas e autorizações; (ii) registros e tratamento de acidentes e quase acidentes; (iii) análise das condições inadequadas; (iv) observações de comportamentos e entrevistas; (v) avaliações psicológicas e traços de perfis; (vi) métricas reativas e pró-ativas; (vii) redundância humana, simulação e inteligência artificial; e (viii) gestão de risco humano, prevenção e mitigação.

Figueiroa (2010) aponta que muitas instituições têm direcionado ações com foco em confiabilidade humana, incluindo o segmento elétrico, petróleo e gás, química e petroquímica, geração de energia nuclear e transporte aéreo. O mesmo autor afirma que, dentre as ações comuns a todas as instituições, aparece a melhoria de procedimentos escritos com o propósito de fortalecer o desempenho humano, através da listagem de situações propensas a erro ou questionários para avaliar a percepção dos líderes e executantes. Neste contexto, uma das principais ações para aumento da confiabilidade e redução de falhas humanas reside na

melhoria dos procedimentos operacionais e criação de sistemáticas de checagem da apropriada execução dos procedimentos.

Já Cacciabue (1988) levanta a importância da identificação de falhas humanas no contexto de Análises Preliminares de Riscos. Nesta, decompõe-se o comportamento do operador em uma sequência de diferentes atos elementares ou subtarefas, atribuindo-se a cada uma delas uma probabilidade de falha. Este tipo de abordagem, embora eficiente em termos de quantificação, tem sido questionada por autores como Norman (1986) e Reason (1988), principalmente com base na análise psicológica, o que implica que somente as consequências de erros humanos são contabilizadas, sem se preocupar com as razões e os mecanismos subjacentes a esses erros. Cacciabue (1988) também sugere que Análises Preliminares de Riscos sejam realizadas considerando o conhecimento dos mecanismos cognitivos a partir do qual eles derivam. Outras frentes a serem consideradas, segundo o autor, incluem atividades motoras combinando fatores psicológicos, formalismos lógicos e teoria de tomada de decisão. Tais atividades visam à estruturação de um modelo cognitivo para complementar as metodologias clássicas e confiabilidade como ferramenta básica para análise detalhada dos sistemas Homem-Máquina em ambientes complexos.

Por sua vez, Cacciabue (2000) propôs a análise de questões fundamentais que envolvem a interação Homem-Máquina e que estão relacionadas a técnicas adotadas para avaliação dos fatores humanos na segurança de usinas nucleares. O autor aponta a necessidade de uma representação mais completa e determinista do raciocínio e do comportamento humano, além de demonstrar como tais fatores permitem a melhoria de desempenho dos processos. Destaca ainda que a concepção de plantas industriais, no âmbito das áreas da tecnologia moderna e aumento da complexidade (como redes da indústria de processo, produção de energia, sistemas de transporte, sistemas de comunicação e de distribuição de energia), têm elevado o grau de ocorrência de acidentes pessoais. Tais acidentes, em sua maioria, estão associados ao comportamento errôneo ou inadequado de operadores e mantenedores, sendo tipicamente decorrentes de incompreensão do fenômeno físico, falta de conhecimento, excesso de confiança e estresse. Cacciabue (2000) conclui afirmando que a consideração de fatores humanos, associados à avaliação de sistemas de engenharia por meio da interação Homem-Máquina, tornou-se chave na busca por ambientes mais seguros e produtivos. Neste contexto, os erros dos operadores e mantenedores, bem como a identificação de suas causas fundamentais, constituem-se no principal problema da relação Homem-Máquina, especialmente no que tange à segurança da planta.

Com propósitos semelhantes, Poucet (1988) fez um levantamento dos métodos estruturados para avaliar a confiabilidade humana. Junto ao Centro de Investigação da Comissão Europeia, o autor lançou uma série de exercícios de *benchmarking* de confiabilidade com o objetivo de avaliar as incertezas envolvidas e chegar a um consenso sobre os procedimentos padrões. Também fazia parte dos objetivos mensurar a probabilidade de os operadores diagnosticarem corretamente as falhas e tomarem decisões adequadas em atividades rotineiras de manutenção. O autor observou ainda que quase todos os participantes utilizaram a Técnica da Taxa de Predição do Erro Humano (THERP) para quantificar as interações humanas, seguido da Metodologia do Índice de Probabilidade de Sucesso (SLIM), que trata da obtenção de uma sentença estruturada sobre probabilidades de erro em tarefas cognitivas.

Kiassat (2013) propôs uma sistemática para quantificar como fatores humanos impactam sobre o risco de falha no exercício das atividades industriais. O autor sugeriu a expansão da aplicação do Modelo de Riscos Proporcionais (PHP), incorporando fatores humanos na análise de riscos operacionais. Segundo Ghasemi & Hodkiewicz (2012) e Si, Wang Hu e Zhou (2011) o PHP é uma ferramenta comumente usada para modelar o tempo de falha do equipamento e a incorporação de fatores humanos em sua estrutura permite uma análise mais ampla de eventuais falhas operacionais.

Por sua vez, Jon (2006) propôs um modelo conceitual para descrever as interações cíclicas de um sistema computacional com os seres humanos que operam nele. O modelo fornece uma base para o correto dimensionamento e análise de sistemas de segurança crítica, transcendendo falhas individuais. O autor ainda traz exemplos de acidentes em que o erro do operador muitas vezes é rapidamente (e convenientemente) identificado como a causa fundamental de sua ocorrência, os quais incluem: (i) em Three-Mile-Island, no ano de 1979, operadores foram confundidos por uma luz de aviso que indicava erroneamente uma válvula a ser aberta, resultando em grave acidente; (ii) em 1988, um operador Aegis tinha a intenção de atingir um iraniano em um F-14, mas atingiu um Airbus civil com 290 pessoas a bordo; a interface Aegis não identificou corretamente a aeronave alvo; (iii) em dezembro de 2001, soldados foram mortos por uma bomba orientada para a sua posição devido à reinicialização do sistema por troca de bateria; (iv) em dezembro de 2004, um avião F/A-22 caiu ao decolar em Nevada; o piloto perdeu o controle do avião em decorrência de uma falha no sistema de controle de voo digital sem que houvesse qualquer aviso de falha.

Estudos de confiabilidade humana em setores de mineração são bastante limitados, levantando a oportunidade para novas abordagens. Ying (2012) demonstrou que estimular comportamentos seguros e restringir comportamentos inseguros proporciona melhoria da confiabilidade humana, reduz circunstâncias inesperadas e frequência de acidentes nas atividades. O autor destaca os elevados níveis de periculosidade na indústria de mineração e sugere uma abordagem comportamental como método para tratativa de questões relacionadas à segurança dos operadores.

Por sua vez, Zheng (2012) realizou uma pesquisa com foco na segurança intrínseca para indústria de mineração a céu aberto. O mesmo enfatiza a complexidade operacional deste segmento industrial e lista fatores que comprometem a segurança, os quais incluem o grande número de trabalhadores, locais de trabalhos dispersos, despejos, instabilidade de taludes e más condições ambientais. O autor sugere ainda a utilização do método de segurança intrínseca como ferramenta para auxiliar projetistas de sistemas e administradores, a fim de garantir alta confiabilidade, melhoria da gestão de segurança e da cultura prevencionista. Zheng (2012) menciona ainda que um projeto de segurança intrínseco bem estruturado pode evitar incêndios ou explosões em equipamentos elétricos causados por centelhas e arcos elétricos, tipicamente encontrados em aplicações de mineração.

### 2.2.1 Modelagem quantitativa de falhas

De acordo com Elsayed (1992), as principais medidas de probabilidade utilizadas em estudos de confiabilidade incluem (i) função acumulada de falhas, $F(t)$; (ii) função densidade de falhas, $f(t)$; (iii) função de confiabilidade, $R(t)$; (iv) função de risco ou taxa de falha, $h(t)$; (v) *Mean Time to Failure* (MTTF); (vi) *Mean Time Between Failures* (MTBF); (vii) *Mean Time to Repair* (MTTR), conforme apresenta o Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição de Medidas de Confiabilidade
Fonte: Adaptado de Elsayed (1992), Lafraia (2001) e Fogliatto; Ribeiro (2009)

| Medida | Definição | Fórmula |
|---|---|---|
| Função acumulada de falhas | Probabilidade de falha no tempo menor ou igual a *t* | $F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u)du$ |
| Função densidade de falha | Variação da probabilidade de falha por unidade de tempo | $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ |
| Função de confiabilidade | Probabilidade de a unidade não falhar em um intervalo de tempo | $R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{+\infty} f(u)du$ |
| Função de risco | Taxa instantânea de falha | $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$ |
| MTTF (*mean time to failure)* | Tempo médio até a falha de uma unidade que não pode ser reparada | $MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt$ |
| MTBF (*mean time between failures)* | Inverso da taxa de falhas, aplicável para equipamentos reparáveis | $MTBF = \frac{1}{h(t)}$ |
| MTTR *(mean time to repair)* | Tempo para reparo de componentes | $MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{N} TPRi}{N}$ |

Segundo Santos (2008), para a análise estatística de confiabilidade, costuma-se ajustar os tempos até a falha a uma distribuição de probabilidade conhecida. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009) e Anzanello (2009), quatro distribuições são normalmente utilizadas para modelar dados de falhas: (i) Exponencial, (ii) Weibull, (iii) Normal e (iv) Log-normal. As funções associadas às distribuições são apresentadas no Quadro 2 e detalhadas na sequência: (i) Exponencial: distribuição com função de risco constante, sendo definida somente por um parâmetro, a taxa de falha (λ); (ii) Weibull: para modelagem de tempos até a falha com função de risco constante, estritamente crescente e estritamente decrescente. Modela adequadamente ampla variedade de situações, com funções de risco distintas. Quando *h(t)* é constante, Weibull transforma-se na distribuição exponencial. É definida por três parâmetros: forma (γ), escala (θ) e posição (Γ); (iii) Normal: distribuição com variações simetricamente distribuídas ao redor da média. Definida por dois parâmetros: localização (μ) e forma (σ); e (iv) Lognormal: é uma distribuição tipicamente utilizada para equipamentos em fase de desgaste,

na modelagem de tempos até reparo e em testes acelerados. Assim como na distribuição normal, tem como parâmetros μ e σ.

Quadro 2 – Relação entre Distribuições e Medidas de Confiabilidade
Fonte: Adaptado de Elsayed (1992), Lafraia (2001) e Fogliatto; Ribeiro (2009)

| | Função densidade de falhas | Função de confiabilidade | Função de risco |
|---|---|---|---|
| Exponencial | $f(t) = \lambda \exp^{\lambda t}$ | $R(t) = \exp^{(-\lambda t)}$ | $h(t) = \lambda$ |
| Weibull | $f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{(\gamma - 1)} e^{\left(-t^{\gamma}/\theta\right)}$ | $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}}$ | $h(t) = \frac{\gamma}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma - 1}$ |
| Normal | $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}$ | $R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$ | $h(t) = \frac{\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma R(t)}$ |
| Lognormal | $f(t) = \frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} e^{\left\{\frac{-1}{2}\left[\frac{(\ln t - \mu)}{\sigma}\right]^2\right\}}$ | $R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)$ | $h(t) = \frac{\phi[(\mu - \ln t)/\sigma]/\sigma t}{\Phi[(\mu - \ln t)/\sigma]}$ |

Segundo Pallerosi et al. (2011), os modelos acima apresentados podem ser adaptados ao contexto de análise de tempos até a falha causados por razões humanas. O autor estabelece os seguintes paralelos entre as quatro distribuições e a análise quantitativa da Confiabilidade Humana: (i) Distribuição Exponencial – quando as falhas humanas ocorrem de modo aleatório, não existindo influências externas (ambientais, estressamentos, etc.) significativas no decorrer da tarefa; (ii) Distribuição Normal – quando as falhas humanas ocorrem quase simetricamente ao redor do valor médio da distribuição, existindo influências externas (ambientais, estressamentos, etc.) significativas (ou não) no decorrer da tarefa. Aplicada quando ocorrem poucas falhas no início ou no fim da missão, concentrando-se em torno de um valor médio; (iii) Distribuição Lognormal – quando as falhas humanas ocorrem principalmente nos períodos iniciais das tarefas e poucas falhas no fim, não existindo influências externas significativas no decorrer da tarefa e apresentando assimetria em relação à média; e (iv) Distribuição Weibull – a mais geral, precisa e prática dentre as possíveis distribuições no estudo da confiabilidade humana, pode englobar, com suficiente precisão e vantagem, a maioria dos casos práticos.

Alinhadas com os objetivos desta tese, as medidas de confiabilidade apresentadas no Quadro 2 permitem determinar intervalos de inspeção e checagem da conformidade dos procedimentos operacionais, reduzindo a ocorrência de falhas humanas decorrentes de desatenção e não cumprimento das normas estabelecidas.

## 2.3 Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA)

Diversas definições de falhas são encontradas na literatura. Segundo Blache e Shrivastava (1994), falhas são eventos que determinam a inadequação de um recurso para o uso; Rausand e Oien (1996), por sua vez, consideram falha como o fim da habilidade de um item executar uma função exigida. Almeida et al. (2006) complementam, afirmando que falhas caracterizam-se como eventos indesejados e responsáveis por erros e mau funcionamento do processo produtivo.

Embora nenhuma operação produtiva seja indiferente a falhas, Slack et al. (2002) afirmam que, em determinadas operações, é crucial que os produtos e serviços não falhem, visto que podem culminar em prejuízos de grandes proporções – aviões em voo, fornecimento de eletricidade a hospitais e funcionamento dos freios de um automóvel, por exemplo. Em outras situações, falhas são incidentais e não representam grande impacto ao processo, podendo, inclusive, serem negligenciadas, tais como a falha da luz interna de iluminação do porta-luvas de um automóvel (Slack et al., 2002). Os mesmos autores acrescentam que atividades de serviços, tais como processos administrativos, judiciais ou extrajudiciais, também estão sujeitas a falhas de projeto e condução das etapas requeridas com a possibilidade de incorreções que penalizam o exercício pleno do propósito do processo.

Blache e Shrivastava (1994) apontam que as organizações precisam discriminar as diferentes falhas e devotar atenção especial àquelas que são inerentemente críticas ou que possam repercutir negativamente na produção ou serviço. Nesse contexto, os autores discriminam os diferentes tipos de falhas em Intermitente e Estendida, Completas e Parciais e, em última instância, Graduais ou Súbitas, resultando em falhas de degradação, ou falhas catastróficas. Além dessa caracterização, Rausand e Oien (1996) segmentam as falhas como decorrentes de desgaste, mau uso por parte dos operadores ou inerentes à fragilidade de materiais ou projeto construtivo.

Segundo Mello e Salgado (2005), para se gerenciar um processo é necessário, primeiramente, visualizá-lo. Assim, procedimentos de mapeamento devem ser realizados para representar as diversas tarefas necessárias e sua sequência para a realização/entrega de um

produto ou serviço. De acordo com Tseng et al. (1999), “o mapeamento de processos deve ser apresentado sob a forma de uma linguagem gráfica que permita expor os detalhes do processo de modo gradual e controlado, descrever o processo com precisão, focar a atenção nas interfaces do mapa do processo, e fornecer uma análise de processos consistente com o vocabulário do projeto”.

Conforme Fernandes (2005), em 1963, durante a missão Apollo, a NASA desenvolveu um método para identificar de forma sistemática falhas potenciais em sistemas, processos ou serviços antes que as mesmas ocorressem. Surgiu então o conceito da Análise de Modos e Efeitos de Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA). A técnica FMEA busca identificar falhas potenciais de forma sistemática, seus efeitos e definir ações que visem reduzir ou eliminar o risco associado a estas falhas, reduzindo, assim, o risco do produto ou processo. Gilchrist (1993) aponta que a FMEA passou a ser aplicada de forma mais abrangente após sua utilização pela montadora de veículos Ford, em 1977.

Stamatis (2003) salienta que a FMEA deve ser aplicada nos estágios iniciais de projeto de sistemas, produtos, componentes, serviços ou processos e deve ser continuamente reavaliada durante toda a vida do sistema, produto, componente, serviço ou processo. O mesmo autor menciona que as principais vantagens da utilização da FMEA incluem: i) melhoria da qualidade, confiabilidade e segurança de produtos e serviços; ii) melhoria da imagem competitiva da empresa frente aos clientes; iii) melhoria da satisfação do cliente; iv) auxílio na identificação de procedimentos de diagnósticos de falhas; v) estabelecimento de prioridades para ações em projetos; vi) auxílio à identificação e prevenção das falhas; e vii) auxílio na definição e priorização de ações corretivas.

Pinho (2008) complementa, apontando que a aplicação da FMEA possibilita reduzir a margem das falhas ocorridas no desenvolvimento do projeto ou processo, bem como antecipar o diagnóstico de prováveis falhas na execução das atividades. O mesmo autor acrescenta que a FMEA proporciona um conhecimento mais profundo do processo, diante do detalhamento proposto por sua metodologia, além de promover o aumento do resultado econômico (por meio da redução dos custos provocados pela ocorrência de falhas, mitigação de perdas de material e retrabalho).

Por sua vez, Fernandes (2005) postula que a FMEA consiste em uma sequência lógica e sistemática de avaliação das formas pelas quais um sistema ou processo está mais sujeito a falhar. Segundo o autor, a FMEA avalia a severidade das falhas, a forma como as mesmas podem ocorrer e como poderiam ser detectadas antes de levarem a reclamações do cliente ou

incidentes de maior escala. Assim, com base em três quesitos (severidade “S”, ocorrência “O” e detecção “D”), o mesmo autor aponta que a FMEA prioriza os modos de falha que geram um maior risco ao cliente. Na sequência são apresentados os elementos que compõem a tabela FMEA; um exemplo genérico de tabela FMEA é apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Tabela FMEA

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **FMEA** | | ***DATA DA EMISSÃO: 16/12/2013*** | | | | | | | |
| | | ***ÚLTIMA REVISÃO:*** | | **NOME: EM(1)** | | | | | |
| **MANUTENÇÃO** | | **RESPONSÁVEL: MANUEL NASCIMENTO** | | | | | | | |
| **ITEM: 001** | | **CONJUNTO: EMPILHADEIRA / RECUPERADORA DE MINÉRIO DE FERRO - ER 151-01** | | | **Mecânica** | | | | |
| **PARTICIPANTES: Supervisores de manutenção mecânica, Técnicos Mecânicos e Mecânicos** | | | | | | | | | |
| **SUB ITEM** | **COMPONENTE** | **FUNÇÃO** | **FALHAS POSSÍVEIS** | | **ÍNDICES** | | | | EM(1) |
| | | | **MODO** | **CAUSAS** | **D** | **O** | **S** | **SH** | **RPN** |
| | TAG do Conjunto | Descrição da função do conjunto | Modo de Falha | Causa 1 | | | | 1 | |
| | | | | Causa 2 | | | | 1 | |
| | | | | Causa 3 | | | | 3 | |

## Item/Função

Lafraia (2001) aponta que o item/função é o campo em que as partes do objeto em análise são desdobradas em suas etapas e operações. Nas primeiras colunas são especificadas as etapas e suas finalidades descritas de maneira concisa, conforme visualizado na 3ª coluna do quadro acima.

## Modos Potenciais de Falha

Segundo Siqueira (2005) e Lafraia (2001), modo de falha é a descrição de como um item em estudo pode falhar, afetando o cumprimento de sua função. Sua concisa definição é chave para a ação de melhoria que irá combater a falha.

## Efeitos Potenciais de Falha

Os efeitos potenciais de falha são definidos como as reações ocasionadas pelos modos de falha. Sua descrição deve ser feita a partir do que o cliente do produto/processo irá perceber após o surgimento do modo de falha (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Siqueira (2005) enfatiza que pesquisar tais efeitos consiste em investigar os meios de propagação dos modos de falha, assim como sua influência nos objetivos do sistema em análise.

## Índice de Severidade (S)

Lafraia et al. (2001) definem o índice de severidade como uma maneira de refletir a gravidade do impacto ocasionado pelos efeitos sob o sistema ou cliente. Fogliatto e Ribeiro (2009) colocam ainda que a severidade é definida a partir de uma avaliação qualitativa do efeito, e sugerem o uso de critérios conforme o Quadro 4.

Nas proposições desta tese, o índice de severidade (S) tradicionalmente reportado na FMEA, foca-se em aspectos de severidade material. Como contribuição original deste estudo, o índice de severidade humana (SH) esta associado com a magnitude de danos focados em aspectos humanos. Estes são representados na 8ª e 9ª colunas do Quadro 3, respectivamente.

Quadro 4 - Escala para avaliação da severidade dos modos de falha
(FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009)

| Severidade | Descrição | Escala |
|---|---|---|
| Muito alta | Quando compromete a segurança da operação ou envolve infração a regulamentos governamentais. | 10<br>9 |
| Alta | Quando provoca alta insatisfação do cliente, por exemplo, um veículo ou aparelho que não opera, sem comprometer a segurança ou implicar infração. | 8<br>7 |
| Moderada | Quando provoca alguma insatisfação, devido à queda do desempenho ou mau funcionamento de partes do sistema. | 6<br>5 |
| Baixa | Quando provoca alguma insatisfação, o cliente observa apenas uma leve deterioração ou quedo no desempenho. | 4<br>3 |
| Mínima | Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema, e a maioria dos clientes talvez nem mesmo note sua ocorrência. | 2<br>1 |

**Causas Potenciais de Falhas**

Segundo McDermott et al. (2009), as causas potenciais de falhas são definidas como uma indicação do modo que pode ocorrer uma falha. Os autores mencionam que, mediante disponibilidade de detalhes das causas, é possível identificar controles apropriados e planos de melhoria. As causas podem ser visualizadas na 5ª coluna do Quadro 3.

**Índice de Ocorrência (O)**

É a estimativa da probabilidade que uma causa venha a ocorrer. Este índice é apresentado na 7ª coluna do Quadro 3. A análise da ocorrência de novos processos e produtos baseia-se em dados estatísticos, informações obtidas de fornecedores e dados da literatura técnica, dentre outros. Caso seja apenas uma revisão de projeto e processo, devem-se obter as informações de relatórios de falhas, históricos de manutenção e gráficos de controle. No Quadro 5 visualiza-se a taxa de falhas e ocorrência.

Quadro 5 – Escala para avaliação da ocorrência em processos (LAFRAIA et al. 2001).

| Possibilidade de falha | Ranking | Taxa de falhas |
|---|---|---|
| *Remota*: A falha é improvável | 1 | < 1 em 1.000.000 |
| *Baixa*: Relativamente poucas falhas | 2<br>3 | 1 em 20.000<br>1 em 4.000 |
| *Moderada*: Falhas ocasionais | 4<br>5<br>6 | 1 em 1.000<br>1 em 400<br>1 em 80 |
| *Alta*: Falhas repetitivas | 7<br>8 | 1 em 40<br>1 em 20 |
| *Muito Alta*: Falhas quase que inevitáveis | 9<br>10 | 1 em 8<br>1 em 2 |

## Índice de Detecção (D)

O índice de detecção está representado na 6ª coluna do Quadro 3. Estima a probabilidade dos controles atuais em detectar as falhas antes que o produto chegue ao cliente ou que as falhas alterem o sistema (LAFRAIA, 2001). Fogliatto e Ribeiro (2009) afirmam que é fundamental melhorar os controles de prevenção e detecção presentes no processo que gere uma redução na sua pontuação, sugerindo a utilização dos critérios apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Escala para avaliação da detecção em processos (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009)

| Possibilidade de detecção | Descrição | Escala |
|---|---|---|
| Muito remota | Os controles não irão detectar esse modo de falha, ou não existem controles | 10 |
| Remota | Os controles provavelmente não irão detercar esse modo de falha, ou não existem controles | 9<br>8 |
| Baixa | Há uma baixa probabilidade de os controles detectarem esse modo de falha | 7<br>6 |
| Moderada | Os controles podem detectar o modo de falha | 5<br>4 |
| Alta | Há uma alta probabilidade de os controles detectarem esse modo de falha | 3<br>2 |
| Muito alta | É quase certo que os controles irão detectar esse modo de falha. | 1 |

## Índice de priorização de risco

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o índice de risco RPN (*risk priority number*) é a maneira mais precisa de hierarquizar as falhas, sendo priorizadas aquelas com o maior RPN para elaboração de um plano de ação que servirá de contramedida às falhas. O RPN é obtido através da multiplicação da pontuação associada a severidade, ocorrência e detecção. Com

isto, tem-se uma escala que vai de 1 a 1000 pontos, sendo 1 um baixíssimo risco e 1000 um risco crítico. Pinho (2008) acrescenta que modos de falha com RPN superiores a 100 requerem maiores esforços da equipe através de ações corretivas. Por fim, o autor aponta que devem ser discutidas as ações de melhoria a serem implantadas no processo para redução da ocorrência das falhas e que o processo de aplicação da FMEA deve ser revisado sempre que houver alteração de um dos fatores que compõem quaisquer fases na execução do serviço.

A execução de uma FMEA é realizada em uma ou mais sessões por grupos multidisciplinares. Segundo Laurenti (2010), essa abordagem permite que todas as áreas funcionais da empresa afetadas pela análise sejam envolvidas. Em prática tem sido demonstrado que a execução da FMEA sob a direção de um facilitador, familiar com o procedimento metodológico, é benéfica, no sentido de evitar discussões referentes ao procedimento de execução do método (BERTSCHI, 2010).

Segundo AAIG (2008), o tamanho do grupo multidisciplinar depende da complexidade do item e do porte da organização, tipicamente variando de 4 a 6 membros. Se menos de 3 ou 4 pessoas estiverem na sessão da análise, corre-se o risco de questões importantes serem deixadas ao lado ou abordadas inadequadamente. Por outro lado, se o grupo consistir de mais de 7 ou 8 membros, a dinâmica das discussões do grupo pode ser enfraquecida por falta de integração entre os membros do grupo (LEVIN e CALAL, 2003; BERTSCHE, 2008). A quarta edição do manual de aplicação do FMEA da AIAG (2008), prescreve que um time não necessita apresentar todos os membros com experiência relevante, mas sim com tempo disponível e autoridade sancionada pela gerência.

Deve-se ainda atentar ao fato de que colaboradores experientes que tem investimento emocional no produto ou processo talvez fiquem demasiadamente sensíveis durante o processo de crítica e se torne defensivos. Devem-se pensar nas vantagens e desvantagens que o conhecimento e experiência deles podem trazer para a discussão antes de incluir ou não estes colaboradores no grupo (LEVIN e KALAL, 2003).

Definida a equipe responsável pelo preenchimento da FMEA, Fernandes et al. (2005) apresentam os principais passos e recomendações para operacionalização da técnica, os quais são agora detalhados:

1. Identificar modos de falha conhecidos e potenciais - Nesta etapa, listam-se as funções (incluindo características ou requisitos) do sistema, produto, componente, serviço ou processo em questão. Para cada uma delas, são identificados, através de técnicas de

*Brainstorming*, todos os possíveis modos de falhas, ou seja, como cada função pode falhar quando for solicitada.

2. Identificar os efeitos de cada modo de falha e a sua respectiva severidade - através do conhecimento teórico ou prático, determina-se o efeito ou os efeitos que cada falha causará ao cliente. Posteriormente, cada modo de falha deve ser classificado quanto à severidade dos efeitos por ele causados, como, por exemplo, perda total de função ou riscos de vida. Para classificação do grau da severidade, utilizam-se tabelas com faixas pré-determinadas, onde 1 representa nenhum impacto ao cliente e 10 uma falha crítica, conforme apresentado no Quadro 4.

3. Identificar as causas possíveis para cada modo de falha e a probabilidade de ocorrência de falhas relacionadas a cada causa - através de técnicas de Brainstorming, histórico de sistemas, produtos, processos ou serviços e conhecimento técnico, são definidas as causas reais e potenciais pelas quais cada modo de falha pode vir a ocorrer. Definidas as causas, são identificados os atuais meios de prevenção, características do sistema, produto, processo ou serviço, que potencialmente reduzem a probabilidade de ocorrência desta falha. Posteriormente, cada causa é classificada quanto a sua probabilidade de ocorrência. Através de tabelas com faixas pré-determinadas, classifica-se a ocorrência através da escala 1-10, onde 1 representa ocorrência remota e 10 uma alta ocorrência, conforme apresentado no Quadro 5.

4. Identificar o meio de detecção no caso da ocorrência do modo de falha e sua respectiva probabilidade de detecção - a detecção de um determinado modo de falha é a capacidade de a falha ser identificada antes que o efeito final ao cliente tenha ocorrido. Assim, os meios de detecção são as formas de verificação e identificação de eventuais falhas presentes no projeto do sistema, produto, processo ou serviço. Classifica-se a detecção fazendo-se uso de tabelas, onde 1 representa uma detecção certa e 10 uma probabilidade remota de detecção, conforme apresentado no Quadro 6.

5. Avaliar o potencial de risco de cada modo de falha e definir medidas de eliminação ou redução do risco de falha - o potencial de risco está associado ao seu impacto ao cliente, ou seja, severidade, probabilidade de ocorrência e probabilidade de detecção. Um risco considerado baixo pode ter ocorrência relativamente alta, baixa probabilidade de ser detectado, porém um impacto não significativo. Ou, em outra situação, um risco baixo pode estar associado a um impacto significativo ao cliente, porém, com ocorrência muito improvável ou alta capacidade de ser detectado antes

que o efeito seja percebido. Um risco é considerado alto quando apresentar um impacto significativo, uma ocorrência provável e baixa capacidade de ser detectado antes de seu efeito ser percebido.

Embora o preenchimento da FMEA apoie-se em etapas bastante simples, Toledo e Amaral (2006) levantam pontos relevantes para sua correta operacionalização. Eles recomendam, na fase de planejamento, a formação de grupos pequenos e multidisciplinares com representantes de cada fase do processo de execução do serviço. Tais representantes são responsáveis pela clara definição dos objetivos da análise, processos a serem analisados e levantamento de material que irá subsidiar as discussões. Os autores enfatizam que o grupo de pessoas responsáveis pela execução da ferramenta FMEA deve conhecer o processo de desenvolvimento para que as informações inseridas no formulário sejam confiáveis.

Dentre aplicações recentes da FMEA para monitoramento de falhas em processos, produtos e procedimentos humanos, destaca-se o estudo de Yang (2014), que apontou que é significativo o aumento da utilização do método de FMEA com o propósito de elevar a confiabilidade de sistemas e componentes. O autor afirma que a FMEA é uma poderosa técnica que permite identificar falhas em produtos ou processos, estimar o impacto das falhas e desenvolver medidas para reduzir ou eliminar o risco de falhas potenciais.

Hamid (2013), na análise de risco de usinas de energia geotérmica, aponta que a FMEA é uma técnica considerada adequada para análise, determinação e classificação de falhas comuns em plantas geotérmicas. Em seu estudo, o autor ainda apresenta as várias aplicações da energia geotérmica (incluindo fermentação, aquecimento e arrefecimento de casas e empresas, aquecimento de estufa, refrigeração, secagem e colheita industrial, derretimento de gelo, balneoterapia, dessalinização, destilação e produção de electricidade), enfatizando potenciais modos de falhas em tais aplicações. O autor acrescenta que poucos estudos sobre confiabilidade de usinas geotérmicas têm sido propostos, e que a aplicação da FMEA é essencial e eficiente para tratativa de modos de falha críticos para aumento de confiabilidade do processo desde a sua concepção.

Thivel (2008), na análise de risco de um processo de combustão de biomassa, aponta que o uso do método FMEA possibilita observar, detalhadamente, os principais riscos associados aos processos de conversão de energia. O autor menciona que a FMEA oferece uma metodologia estruturada e sistemática na manutenção industrial para diagnóstico e tratamento de falhas; possibilitando detectar e avaliar modos de falhas do sistema baseado em um ranking de acordo com sua criticidade. Por fim, o autor afirma que a FMEA é base para

um melhor controle do processo (implementação de barreiras de proteção e prevenção) e que contribui para a melhoria da segurança do operador. Com propósitos semelhantes, Fan (2013) aborda a questão relacionada à análise crítica de eventos de falha induzida por software na indústria nuclear. Para tanto, apresenta um modelo de análise dos modos de falha integrado ao FMEA para observar as inconsistências dos sistemas de computação e torná-los mais seguros.

Cepin (2007) aponta que a análise da confiabilidade humana tem sido investigada intensamente e que, nas últimas décadas, muitos métodos têm sido desenvolvidos. O autor destaca que a contribuição do fator humano para a segurança das instalações é grande, apesar da intensiva automação de sistemas e processos. Leeuwena (2009) menciona que a análise de risco pela FMEA pode ser utilizada para avaliar erro humano, destacando que a confiabilidade de um procedimento analítico extrapola aspectos técnicos e instrumentais. Kieffer (1998) complementa apontando que, em muitos casos, as etapas do processo relacionadas à intervenção humana são preteridas e ignoradas frente a falhas relacionadas a aspectos mecânicos e tecnológicos.

Verbano (2010), em sua metodologia de análise de confiabilidade para gestão de risco clínico associado a fatores humanos, aponta que as organizações do setor de saúde reconhecem o fato de que erros humanos, falhas de sistemas e eventos adversos devem ser gerenciados e controlados para garantir confiabilidade. O autor destaca que o sistema de saúde é altamente complexo, e que erros clínicos são questão de grande relevância e com forte impacto social. O mesmo autor menciona que nem todos os erros humanos podem ser eliminados, porém aponta que ações norteadas pela FMEA podem ser implementadas para aumentar a qualidade dos serviços de saúde e garantir a segurança do paciente.

## 2.4 Seleção de especialistas

Segundo Calil (2010), o processo de análise dos modos e efeitos de falhas requer um trabalho de equipe contendo vários especialistas, cuja formação deverá ser dada pelas áreas envolvidas, de modo que cada membro contribua com diferentes experiências e conhecimentos. Stamatis (2005) acrescenta que as decisões tomadas nas reuniões de preenchimento da FMEA devem ser consensuais e não pela maioria. Assim, para alcançar um consenso, cada membro da equipe deve estar disposto a receber ideias, apresentar uma postura contributiva, ouvir ativamente os outros pontos de vista, verificar e descobrir as razões das outras opiniões e saber confrontar com as diferenças de maneira não agressiva.

Calil (2010) afirma que, nas etapas iniciais da análise (por exemplo, no levantamento dos modos de falha), é muito importante que haja participação ativa dos colaboradores. Tipicamente, não se verificam dificuldades acentuadas para o gerenciamento do trabalho do grupo durante essa etapa, tendo em vista que em um processo criativo o foco é a geração de ideias. Já nas etapas finais, durante a quantificação dos índices da FMEA (severidade, ocorrência e detecção), a influência de um participante sobre outro pode atrapalhar, alterando os valores dos índices significativamente (CALIL, 2010). Desta forma, torna-se apropriada a análise e seleção dos especialistas mais consistentes em termos de suas opiniões, de maneira a minimizar a chance de serem consideradas opiniões extremistas ou tendenciosas na hierarquização dos modos de falha.

Dentre estudos recentes que tratam da seleção de especialistas com maior consistência, destaca Anzanello et al. (2010), que propuseram uma sistemática baseada em Análise de Componentes Principais e ferramentas de *data mining* para identificação dos painelistas mais consistentes em avaliações sensoriais. A manutenção das opiniões dos especialistas mais alinhados entre si aumentou a acurácia de um sistema de classificação de formulações alimentícias.

Nottar (2013) propôs uma abordagem para seleção de especialistas com vistas ao ajuste qualitativo de demanda originada por modelos de previsão quantitativos. O estudo foi aplicado na previsão de demanda do setor agrícola. Os resultados corroboraram que as opiniões de um grupo reduzido de especialistas conduzem a previsões mais precisas, ajustando inconsistências dos modelos quantitativos.

Por sua vez, Pinto et al. (2014) compararam sistemáticas de avaliação de consistência de painelistas em avaliações sensoriais, propondo um novo indicador de comparação baseado no alfa de Crombach para análise de quesitos de reprodutibilidade e repetibilidade. O método foi validado através da sua aplicação em painéis sensoriais utilizados na análise de alimentação destinada ao exército americano.

Não foram encontradas na literatura, no entanto, sistemáticas estruturadas para seleção de especialistas com vistas ao preenchimento da FMEA, lacuna essa endereçada pela presente tese.

Para apontamento dos modos de falhas foram selecionados especialistas das áreas de engenharia, planejamento, manutenção preventiva, manutenção corretiva, operação, vulcanização e oficina de subconjuntos com experiência de no mínimo 3 anos na função e que

atuam nas manutenções e tratamento de falhas no equipamento em estudo. A Tabela 2 apresenta a quantidade de especialistas escolhidos para apontamento dos modos de falhas e preenchimento inicial da planilha FMEA.

Tabela 2 – Especialistas escolhidos para apontamento dos modos de falhas

| Apontamentos dos Modos de Falhas | Natureza / Qtde | | |
|---|---|---|---|
| | Mecânica | Elétrica | Total |
| Engenheiros | 2 | 1 | 3 |
| Supervisores | 5 | 4 | 9 |
| Técnicos | 5 | 4 | 9 |
| Mecânicos | 3 | 0 | 3 |
| Vulcanizadores | 5 | 0 | 5 |
| Eletricistas | 0 | 6 | 6 |
| Total | 20 | 15 | 35 |

# 3 METODOLOGIA

Esta seção descreve as etapas operacionais da sistemática proposta para avaliação de confiabilidade humana em mina a céu aberto. Este estudo tem como objetivo principal gerar um plano de melhorias com base em uma análise de confiabilidade quantitativa e qualitativa das falhas originadas por erros humanos. Os passos propostos envolvem a identificação de especialistas para preenchimento da FMEA, seleção de especialistas mais consistentes para cálculo dos RPNs, modelagem quantitativa dos tempos até a falha dos modos de falhas, tratativa dos dados coletados, determinação de intervalos para avaliação da conformidade do modo de execução dos procedimentos, estruturação de planos de ações de melhorias para os modos de falhas preponderantes.

## 3.1 Identificar especialistas para preenchimento da FMEA

A escolha de especialistas para preenchimento da FMEA deve ser feita de modo que todas as áreas funcionais da empresa sejam representadas (AAIG, 2008). Os especialistas devem deter experiência, conhecimentos metodológicos e técnicos referentes aos modos de falhas, suas causas e consequências. Considerando a diversidade de modos de falhas (mecânicos, elétricos, de instrumentação, de vulcanização, hidráulicos, de lubrificação, de engenharia, dentre outros) presentes nos processos em análise, torna-se fundamental a presença de representantes de todas as disciplinas para garantir consistência nas avaliações. Para o equipamento definido para estudo de caso foram identificados os colaboradores (especialistas) que apresentam maior conhecimento e atuação na manutenção do equipamento. Foram escolhidos engenheiros, supervisores de manutenção mecânica, supervisores de manutenção elétrica, técnicos especializados de manutenção (mecânica, elétrica e vulcanização), mecânicos, eletricistas e vulcanizadores.

## 3.2 Preencher parcialmente a FMEA com todos os especialistas

O preenchimento da FMEA deve seguir os passos apresentados na seção 2.3, com exceção do cálculo do RPN e proposição de melhorias; tal índice somente será estimado (e as melhorias estabelecidas) depois que os especialistas mais consistentes em suas opiniões (avaliadas através dos índices da FMEA) forem conhecidos.

Recomenda-se que cada participante faça o preenchimento de forma individual, a fim de assegurar integridade de análise de cada especialista. O preenchimento individual permite que o especialista não hesite em expor sua análise na íntegra, não se sinta desconfortável em

expressar suas opiniões (evitando pressões de especialistas mais experientes), acelere a etapa de análise e preenchimento da FMEA e reduza tempo para execução da pesquisa.

Além do preenchimento dos índices de Ocorrência, Detecção e Severidade tradicionalmente existentes na FMEA, propõe-se a incorporação do índice de Severidade Humana (SH), sugestão original desta tese. O SH visa quantificar especificamente o impacto de cada modo de falha sobre a integridade física dos funcionários vinculados ao processo em que tal falha ocorre. A ocorrência de tais falhas pode gerar acidentes que demandam atendimentos ambulatoriais, afastamentos, fatalidades ou perdas produtivas por baixa indisponibilidade física do equipamento ou instalação. No Quadro 7 é apresentada a escala sugerida para avaliação dos efeitos dos modos de falha para o índice SH.

Quadro 7 – Sugestão de escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha para Severidade Humana (SH)

| Severidade Humana (SH) | Descrição | Escala |
|---|---|---|
| Leve | Erro humano que pode ocasionar acidentes que demanda somente primeiros socorros | 1 |
| Moderada | Erro humano que pode ocasionar acidentes sem afastamento (com restrição, com tratamento médico) | 3 |
| Grave | Erro humano que pode ocasionar acidentes com afastamento. | 5 |
| Crítica | Erro humano que pode ocasionar acidentes incapacitantes permanentes ou 01 (uma) fatalidade. | 8 |
| Catastrófica | Erro humano que pode ocasionar acidente resultando em mais de 01 (uma) fatalidade. | 10 |

Conforme apresentado no Quadro 7 falhas humanas que podem ocasionar acidentes que demandam atendimentos ambulatoriais ou primeiros socorros (pequenas escoriações no corpo devido projeção de materiais, dores lombares, estresse emocional pós-traumático) são classificados como “Leve”. Prensamento de membros (dedos, mão, braços, pés, pernas) causadores de traumas que limitam a atuação do colaborador em suas funções plenas, mas que não geram afastamento temporário do trabalho é classificado como “Moderada”. Falhas “Graves” são aquelas associadas a traumas que geram afastamento temporário do trabalho podendo estar relacionadas a fraturas causadas por quedas de mesmo nível, de nível diferente, pensamento/esmagamento de membros e batidas de parte do corpo contra estruturas metálicas, por exemplo. As falhas “Críticas” e “Catastróficas” são falhas que podem ocasionar acidentes incapacitantes permanentes (mutilações em partes do corpo, lesões irreversíveis no sistema motor, por exemplos) inclusive fatalidades.

## 3.3 Selecionar os especialistas mais consistentes

A seleção dos especialistas mais consistentes no preenchimento da FMEA é fundamental para garantia de qualidade da análise e posterior geração do plano de melhorias,

visto que eleva a qualidade e a consistência da observação, possibilita maior coerência das informações, desconsidera avaliações extremistas e permite proposição de melhorias realistas e mais assertivas.

Para avaliar o desempenho de especialistas, utiliza-se o coeficiente de correlação $Rv$ (ESCOUFIER, 1973), o qual mede a correlação entre pares de matrizes de dados, variando de 0 a 1. Quando utilizado para avaliar a correlação entre especialistas, os índices atribuídos pelos mesmos na planilha FMEA compõem as matrizes de dados. Um coeficiente $Rv$ = 0 indica que os índices da FMEA sugeridos pelos dois especialistas em análise são totalmente diferentes (indicando forte dissonância); um coeficiente igual a 1,0 indica o oposto, isto é, valores absolutamente iguais (ESCOUFIER, 1973), apontando dois especialistas com elevado nível de concordância.

Matematicamente, o coeficiente $Rv$ mede quão similares são as informações entre duas matrizes de dados $\mathbf{X}_1$ e $\mathbf{X}_2$. O coeficiente de correlação $Rv$ entre tais matrizes pode ser calculado pela Equação (1):

$$R_v(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) = \frac{tr[\mathbf{X}_1\mathbf{X}_1^t\mathbf{X}_2\mathbf{X}_2^t]}{\sqrt{tr(\mathbf{X}_1\mathbf{X}_1^t)^2]tr[(\mathbf{X}_2\mathbf{X}_2^t)^2]}} \qquad (1)$$

sendo $\mathbf{X}_1$ e $\mathbf{X}_2$ as matrizes de índices preenchidos na FMEA (Ocorrência, Detecção, Severidade e Severidade Humana) pelos especialistas 1 e 2, respectivamente, e suas transpostas, $\mathbf{X}_1^t$ e $\mathbf{X}_2^t$.

Para o cálculo da matriz de correlação composta pelos coeficientes $Rv$ (denominada matriz $Rv$) foram utilizadas as matrizes de dados de cada especialista, $\mathbf{X}_j$. Considerou-se a matriz de índices da FMEA $\mathbf{X}_j$ composta por $N$ linhas e 4 colunas, onde cada linha representa um modo de falha e cada coluna um índice.

A matriz $Rv$ resultante é composta pelas distâncias entre cada par de especialistas, onde $j$ identifica o especialista, $j$=1,...,$J$., conforme exemplificado abaixo.

$$Matriz\ \mathbf{R}_v = \begin{bmatrix} R_v(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_1) & \dots & R_v(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_J) \\ \vdots & & \vdots \\ R_v(\mathbf{X}_J, \mathbf{X}_1) & \dots & R_v(\mathbf{X}_J, \mathbf{X}_J) \end{bmatrix}$$

O Quadro 8 traz uma matriz hipotética que apresenta o nível de correlação (reciprocidade) entre especialistas genéricos. Cada valor representa o grau de consistência entre os pares de especialistas. Pode-se observar que o grau de consistência de um especialista

com ele próprio é máximo, sendo representado pelo número 1. A comparação de um especialista com os demais geram valores entre 0 e 1; quanto maior o valor, maior a consistência entre os especialistas. Por exemplo, observa-se que os especialistas 1 e 2 possuem elevado grau de consenso (0,9943), enquanto que os especialistas 1 e 9 possuem menor grau de consenso (0,9671).

Quadro 8: Matriz $Rv$ hipotética

| | Esp 1 | Esp 2 | Esp 3 | Esp 4 | Esp 5 | Esp 6 | Esp 7 | Esp 8 | Esp 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Esp 1 | 1 | 0.9943 | 0.9917 | 0.9963 | 0.9921 | 0.992 | 0.9904 | 0.9958 | 0.9671 |
| Esp 2 | 0.9943 | 1 | 0.9916 | 0.9969 | 0.9948 | 0.9949 | 0.9962 | 0.9959 | 0.9725 |
| Esp 3 | 0.9917 | 0.9916 | 1 | 0.9948 | 0.9917 | 0.9891 | 0.9877 | 0.9928 | 0.9663 |
| Esp 4 | 0.9963 | 0.9969 | 0.9948 | 1 | 0.9946 | 0.9931 | 0.9935 | 0.9979 | 0.9735 |
| Esp 5 | 0.9921 | 0.9948 | 0.9917 | 0.9946 | 1 | 0.9952 | 0.9913 | 0.9945 | 0.9692 |
| Esp 6 | 0.992 | 0.9949 | 0.9891 | 0.9931 | 0.9952 | 1 | 0.9901 | 0.9919 | 0.9737 |
| Esp 7 | 0.9904 | 0.9962 | 0.9877 | 0.9935 | 0.9913 | 0.9901 | 1 | 0.9939 | 0.9773 |
| Esp 8 | 0.9958 | 0.9959 | 0.9928 | 0.9979 | 0.9945 | 0.9919 | 0.9939 | 1 | 0.9726 |
| Esp 9 | 0.9671 | 0.9725 | 0.9663 | 0.9735 | 0.9692 | 0.9737 | 0.9773 | 0.9726 | 1 |

Com vistas à identificação dos especialistas com maior grau de concordância, o Quadro 8 recebe uma nova coluna no extremo direito, trazendo as medianas de $Rv$ para cada especialista. A mediana é utilizada por representar uma medida de tendência central (correspondente ao valor que divide a amostra ao meio), tendo a vantagem de não ser influenciada por valores individuais erráticos, extremos e não significativos. Na sequência, calcula-se a média das medianas; somente os especialistas com mediana superior à média das medianas são mantidos na análise.

Outros limites para seleção dos especialistas podem ser utilizados, de acordo com o âmbito e segmento de análise. Pode-se utilizar, também, os maiores valores de correlação obtidos e, assim sendo, estabelecer critérios para seleção de um número específico de especialistas.

## 3.4 Calcular o RPN com base nos especialistas selecionados

O cálculo do Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number* - RPN) foi realizado utilizando as medianas dos índices levantados para cada modo de falha e cada especialista selecionado, com o propósito de evitar influência de valores extremos nos índices coletados. O RPN deve incluir o novo índice de severidade (Severidade Humana); tal inserção torna necessário o ajuste da tradicional forma de cálculo do RPN, conduzindo à Equação (2).

$$RPN = O \ x \ D \ x \sqrt{SM \ x \ SH} \qquad (2)$$

Onde “O’ representa o índice de ocorrência; “D” de detecção; “SM” de severidade material e, “SH” o índice de severidade humana.

Esta nova forma de cálculo garante que o RPN não viola o limite máximo preconizado pela literatura, 1000 (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Nas proposições desta tese, serão mantidos somente os modos de falhas com RPN>100.

## 3.5 Modelar quantitativamente os tempos até a falha dos modos preponderantes

Freitas (2001) aponta que a modelagem quantitativa tem sido cada vez mais utilizada por analistas, engenheiros, administradores e técnicos na busca de soluções mais precisas. A modelagem quantitativa dos tempos até a falha dos modos preponderantes identificados na seção 3.4 possibilitará determinar intervalos de reavaliação (checagem) do modo de execução dos procedimentos com maiores RPNs, além de enriquecer as observações e proposição de melhorias. É importante enfatizar que, nas proposições desta tese, a etapa de modelagem quantitativa somente é realizada para os modos de falha que contabilizam 20 ou mais falhas nos registros históricos. Tal limite assegura número suficiente de observações para modelagem e geração das inferências. Os procedimentos operacionais desta etapa são agora detalhados.

### 3.5.1 Coletar tempos até a falha dos modos preponderantes

Os dados de tempo até a ocorrência de falha motivada por erros humanos devem ser coletados dos registros de manutenção corretiva da empresa pesquisada, uma vez que toda manutenção corretiva é decorrente de uma falha efetivamente verificada. Tendo-se em vista que registros de falha tradicionalmente são armazenados no formato de data de ocorrência, faz-se necessário calcular o intervalo de tempo transcorrido entre duas falhas, o que conduz ao tempo até ocorrência de falha ocasionada por erro humano (sendo esse o dado necessário para a modelagem quantitativa).

### 3.5.2 Tratar os dados coletados

Os dados foram separados de acordo com o modo de falha motivado por erro humano. A empresa em estudo utiliza os seguintes modos de falha: mecânico, elétrico, de instrumentação, de automação, de vulcanização e de engenharia. Esta tese focará nos modos de falha mecânicos e elétricos motivados por erros humanos com 20 ou mais ocorrências para cada modo de falha preponderante apontado pela FMEA, de modo a assegurar significância estatística à modelagem.

Na sequência, os tempos até a falhas são analisados. Recomenda-se a remoção de dados espúrios (tipicamente compostos por tempos até a falha muito curtos, denotando situações atípicas de processo), visto que podem distorcer a modelagem e inferências (ELSAYED, 1996).

### 3.5.3 Modelar os tempos até a falha

A modelagem dos tempos até a falha dos modos preponderantes é feita através de aplicativo estatístico; recomenda-se o uso do software de confiabilidade Proconf, porém outros softwares de modelagem estatística podem ser utilizados. O aplicativo Proconf permite avaliar a adequação de distribuições paramétricas (Weibull, Normal, Lognormal ou Exponencial) aos dados coletados. A escolha da melhor distribuição apoia-se no papel de probabilidade e em dois testes de aderência: Teste Analítico do $\chi^2$ e Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (MONTGOMERY, 2003). Ambos avaliam se a hipótese da distribuição escolhida deve ou não ser rejeitada, não sendo, portanto, definitivos.

Após identificar a distribuição que melhor modela os tempos até a falha, são gerados os gráficos típicos para análise de confiabilidade humana, os quais incluem a função de confiabilidade dependente do tempo $t$ de operação, $R(t)$ (a que pode ser utilizada para determinar intervalos de avaliação do modo de execução das atividades, com vistas à redução da ocorrência de falhas), e a taxa de falha, $h(t)$. Tais gráficos permitem avaliar a queda da confiabilidade humana com o passar do tempo, a qual é justificada por incremento na desatenção dos funcionários e esquecimento no modo de execução dos procedimentos, dentre outros fatores. Por fim, é possível verificar o MTTF (Tempo Médio até a Falha) dos funcionários, o qual permite estimar o tempo médio estimado para a ocorrência de um novo evento de falha decorrente de ação humana.

### 3.5.4 Determinar intervalos para avaliação da conformidade do modo de execução dos procedimentos analisados

Esta etapa visa definir intervalos de análise para avaliação da conformidade do modo de execução dos procedimentos e identificação de eventuais inconsistências na forma de execução das atividades pelos funcionários. O intervalo de verificação é definido com base no gráfico de Confiabilidade, $R(t)$.

A confiabilidade limite do sistema deve ser estimada pelos engenheiros responsáveis pelo processo em análise, sendo $R(t)$ entre 0,80 e 0,90 um valor tradicionalmente utilizado em aplicações industriais (ELSAYED, 1996). Com este limite definido, é possível determinar o

intervalo de verificação das sistemáticas de operação. Como exemplo, na Figura 1 é possível identificar um intervalo intervenção de cinco dias para uma confiabilidade aproximada de 0,85. A exemplo do que acontece na substituição de sistemas industriais, é importante enfatizar que a avaliação do procedimento e eventual intervenção na forma humana de execução assegura que o procedimento volta a ser executado de forma adequada.

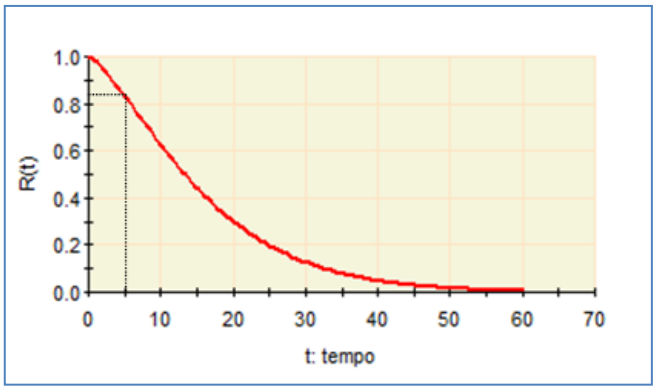



Figura 1 – Função de Confiabilidade $R(t)$

O valor de MTTF também pode ser utilizado para estimar o intervalo de inspeção das atividades com vistas à identificação de procedimentos inconsistentes.

### 3.6 Propor plano de ações de melhorias para os modos de falha preponderantes

O plano de melhorias deve considerar a necessidade de tratativas de comportamentos humanos que tenham relação com aspectos cognitivos (percepção, atenção, memória, raciocínio, juízo, imaginação, pensamento, linguagem, etc.) e socioemocionais (autonomia, estabilidade emocional, sociabilidade, capacidade de superar fracassos, curiosidade, perseverança, etc.) capazes de impactar na execução dos procedimentos e conduzir a eventuais falhas. O plano de melhoria deve ser gerado com base no conhecimento de especialistas e disponibilizado em ambiente de fácil acesso (intranet) para facilitar a consulta, atualização e avaliação de sua exequibilidade. Além das medidas visando reduzir as causas humanas nas falhas, também é necessário definir prazos de implementação das ações e responsáveis por sua implantação.

Nas proposições desta tese, todos os modos de falha com RPN>100 recebem um plano de ação. Modos de falha cujos tempos até a falha possibilitaram modelagem quantitativa são candidatos naturais para planos de melhorias mais consistentes, visto que a análise temporal das falhas permite estabelecer intervalos de inspeção e treinamento para sua redução (o que não é possível em modos de falhas com poucas repetições).

# 4 RESULTADOS

A sistemática proposta para avaliação de confiabilidade humana foi aplicada no Complexo Minerador de Carajás, no sudeste do Pará, o qual iniciou suas operações de extração de minério de ferro em 1985. Com produção anual de 150 milhões de toneladas, a mina de ferro da Vale em Carajás é considerada a maior mina a céu aberto do mundo. Em 2007, o complexo minerador alcançou a marca histórica de um bilhão de toneladas produzidas.

O processo produtivo em questão inicia com a lavra da matéria prima principal - ROM ("*Run of Mine*"), proveniente das cavas. Na sequência, tal material é processado pela usina de beneficiamento através das operações de cominuição, classificação, estocagem e recuperação.

Após o processamento do ROM, os produtos (minérios) são gerados de acordo com diversas composições granulométricas e transportados para os pátios de estocagem. Depois da estocagem, iniciam-se os processos de recuperação (carregamento das pilhas de minério nos vagões), o qual é realizado por seis máquinas recuperadoras que coletam o minério das pilhas, na área de estocagem, e colocam em correias transportadoras que conduzem o minério para quatro silos de carregamento. Por fim, o minério é transportado (expedido) por trens que percorrem 892 km até São Luís do Maranhão, onde é embarcado em navios para mais de 30 países.

Para ilustração da sistemática proposta, foram coletadas informações de 2057 intervenções corretivas de manutenção da máquina Empilhadeira/Recuperadora de Minério de Ferro (ER151K-01) compreendidas no período de janeiro a setembro de 2013. A Figura 2 mostra a ER151K-01. As intervenções foram extraídas do sistema de Gestão Operacional da Vale no modo Manutenção (GPV-M) onde são registradas as paradas ocorridas com suas apropriações de modos de falhas e tempos.

Figura 2 – Empilhadeira e Recuperadora ER 151K-01

As intervenções são de natureza mecânica, elétrica, de instrumentação, de automação, de vulcanização, de engenharia e preventiva. Neste estudo foram analisadas as intervenções de mecânicas (incluindo as falhas de vulcanização - devido convergência) e elétricas decorrentes de erros humanos, correspondendo a 854 falhas mecânicas e 544 ocorrências elétricas. A Figura 3 apresenta o quantitativo das falhas coletadas.

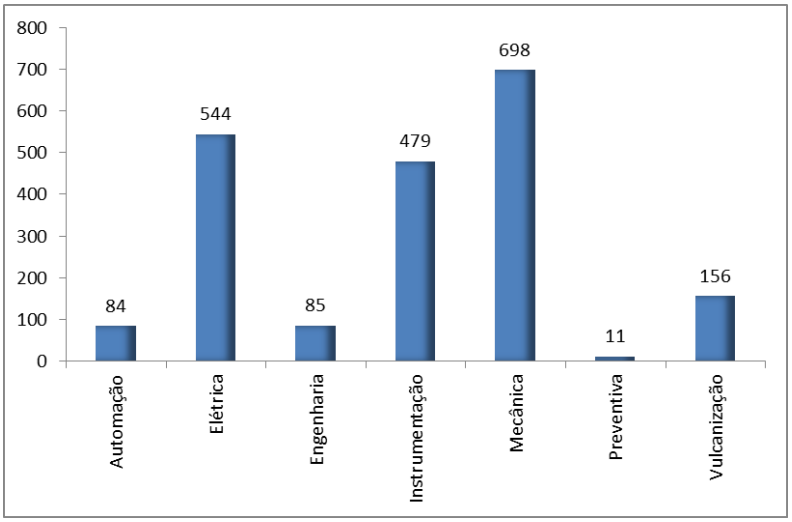



Figura 3 – Falhas Ocorridas na ER 151K-01 no Período de Jan a Set/13
Fonte: Banco de dados do GPV-M Vale

Para identificação dos modos de falhas decorrentes de erros humanos foram utilizados grupos focados compostos por colaboradores (especialistas) experientes que desenvolvem atividades na área em que está inserido o equipamento escolhido para o estudo de caso

(engenheiros de manutenção, supervisores, técnicos de manutenção). Foram formados dois grupos focados: um de elétrica e outro de mecânica. Os especialistas fizeram a separação dos modos de falhas causados por erros humanos e não humanos. Apenas os modos de falhas causados por erros humanos foram considerados neste estudo.

Esta máquina foi selecionada por apresentar o maior perfil de perdas para o período observado. A Figura 4 apresenta o perfil de perdas da ER 151K-01 no período de Janeiro a Setembro de 2013, representado 232 horas de paradas corretivas.

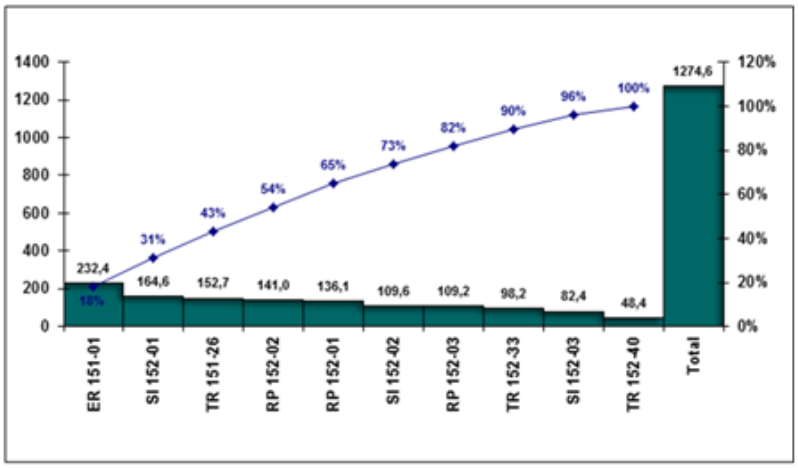



Figura 4 – Perfil de Perdas da Expedição da Usina 1 no Período de Jan a Set/13
Fonte: Banco de dados da Engenharia de Manutenção

O estudo de caso aqui apresentado divide-se em duas frentes: inicialmente são abordadas as falhas de origem mecânica e, na sequência, as falhas de origem elétrica. É importante enfatizar que tais eventos, independente de serem mecânicos ou elétricos, foram motivados por erros humanos, decorrentes de imperícia, desatenção ou esquecimento dos procedimentos associados à ER151K-01.

## 4.1 Falhas Mecânicas

Ocorrências de falhas mecânicas por razões humanas podem ser exemplificadas por manutenção inadequada, operação incorreta dos equipamentos (sobrecarga estática ou dinâmica), inspeção inadequada e erro na elaboração ou implementação de um projeto. As falhas mecânicas observadas na Empilhadeira/Recuperadora vinculadas a razões humanas (falhas de operação, manutenção ou inspeção) estão relacionadas ao sistema de lubrificação, ao sistema hidráulico, transportador de correia (*tripper* e lança), aos acoplamentos, chutes, roletes, redutores de velocidade, estrutura, caçambas e rolamentos.

Foram escolhidos 20 especialistas para preenchimento parcial da FMEA relativa a falhas mecânicas motivadas por razões humanas, conforme descrito na seção 3.2. O preenchimento dos 4 índices da planilha FMEA foi feito por todos os especialistas. Na sequência, gerou-se a matriz dos coeficientes *Rv* conforme o Quadro 9; 12 especialistas foram selecionados por conta dos seus elevados níveis de concordância (consistência) no preenchimento dos índices da FMEA. Os especialistas selecionados são destacados na última coluna do Quadro 9.

Quadro 9 - Matriz *Rv* para Falhas Mecânicas

| | | ESPECIALISTAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | Medianas | Classificação |
| ESPECIALISTAS | 1 | 1,000 | 0,922 | 0,887 | 0,954 | 0,947 | 0,821 | 0,921 | 0,811 | 0,885 | 0,909 | 0,763 | 0,931 | 0,830 | 0,882 | 0,879 | 0,894 | 0,920 | 0,894 | 0,906 | 0,937 | **0,900** | Selecionado |
| | 2 | 0,922 | 1,000 | 0,829 | 0,907 | 0,919 | 0,810 | 0,863 | 0,846 | 0,830 | 0,888 | 0,787 | 0,887 | 0,787 | 0,835 | 0,834 | 0,877 | 0,907 | 0,869 | 0,895 | 0,909 | **0,873** | Selecionado |
| | 3 | 0,887 | 0,829 | 1,000 | 0,879 | 0,892 | 0,753 | 0,826 | 0,729 | 0,835 | 0,852 | 0,714 | 0,873 | 0,745 | 0,875 | 0,874 | 0,800 | 0,839 | 0,849 | 0,829 | 0,847 | **0,843** | Não Selecionado |
| | 4 | 0,954 | 0,907 | 0,879 | 1,000 | 0,927 | 0,817 | 0,890 | 0,795 | 0,866 | 0,908 | 0,748 | 0,908 | 0,840 | 0,861 | 0,848 | 0,862 | 0,887 | 0,891 | 0,899 | 0,916 | **0,889** | Selecionado |
| | 5 | 0,947 | 0,919 | 0,892 | 0,927 | 1,000 | 0,848 | 0,898 | 0,822 | 0,868 | 0,902 | 0,781 | 0,924 | 0,810 | 0,887 | 0,887 | 0,882 | 0,920 | 0,878 | 0,903 | 0,941 | **0,895** | Selecionado |
| | 6 | 0,821 | 0,810 | 0,753 | 0,817 | 0,848 | 1,000 | 0,776 | 0,798 | 0,767 | 0,841 | 0,790 | 0,829 | 0,762 | 0,743 | 0,734 | 0,846 | 0,834 | 0,829 | 0,831 | 0,865 | **0,819** | Não Selecionado |
| | 7 | 0,921 | 0,863 | 0,826 | 0,890 | 0,898 | 0,776 | 1,000 | 0,778 | 0,794 | 0,852 | 0,738 | 0,868 | 0,809 | 0,816 | 0,813 | 0,852 | 0,863 | 0,879 | 0,864 | 0,883 | **0,858** | Selecionado |
| | 8 | 0,811 | 0,846 | 0,729 | 0,795 | 0,822 | 0,798 | 0,778 | 1,000 | 0,764 | 0,823 | 0,851 | 0,780 | 0,730 | 0,737 | 0,754 | 0,837 | 0,825 | 0,791 | 0,831 | 0,850 | **0,804** | Não Selecionado |
| | 9 | 0,885 | 0,830 | 0,835 | 0,866 | 0,868 | 0,767 | 0,794 | 0,764 | 1,000 | 0,870 | 0,698 | 0,867 | 0,710 | 0,842 | 0,856 | 0,802 | 0,849 | 0,798 | 0,836 | 0,842 | **0,839** | Não Selecionado |
| | 10 | 0,909 | 0,888 | 0,852 | 0,908 | 0,902 | 0,841 | 0,852 | 0,823 | 0,870 | 1,000 | 0,771 | 0,912 | 0,755 | 0,852 | 0,853 | 0,877 | 0,857 | 0,873 | 0,905 | 0,900 | **0,872** | Selecionado |
| | 11 | 0,763 | 0,787 | 0,714 | 0,748 | 0,781 | 0,790 | 0,738 | 0,851 | 0,698 | 0,771 | 1,000 | 0,743 | 0,732 | 0,696 | 0,711 | 0,796 | 0,813 | 0,748 | 0,808 | 0,831 | **0,767** | Não Selecionado |
| | 12 | 0,931 | 0,887 | 0,873 | 0,908 | 0,924 | 0,829 | 0,868 | 0,780 | 0,867 | 0,912 | 0,743 | 1,000 | 0,789 | 0,883 | 0,869 | 0,843 | 0,888 | 0,873 | 0,858 | 0,895 | **0,873** | Selecionado |
| | 13 | 0,830 | 0,787 | 0,745 | 0,840 | 0,810 | 0,762 | 0,809 | 0,730 | 0,710 | 0,755 | 0,732 | 0,789 | 1,000 | 0,725 | 0,719 | 0,773 | 0,773 | 0,823 | 0,796 | 0,811 | **0,780** | Não Selecionado |
| | 14 | 0,882 | 0,835 | 0,875 | 0,861 | 0,887 | 0,743 | 0,816 | 0,737 | 0,842 | 0,852 | 0,696 | 0,883 | 0,725 | 1,000 | 0,967 | 0,797 | 0,840 | 0,800 | 0,805 | 0,855 | **0,841** | Não Selecionado |
| | 15 | 0,879 | 0,834 | 0,874 | 0,848 | 0,887 | 0,734 | 0,813 | 0,754 | 0,856 | 0,853 | 0,711 | 0,869 | 0,719 | 0,967 | 1,000 | 0,798 | 0,841 | 0,792 | 0,826 | 0,859 | **0,845** | Não Selecionado |
| | 16 | 0,894 | 0,877 | 0,800 | 0,862 | 0,882 | 0,846 | 0,852 | 0,837 | 0,802 | 0,877 | 0,796 | 0,843 | 0,773 | 0,797 | 0,798 | 1,000 | 0,869 | 0,875 | 0,888 | 0,930 | **0,857** | Selecionado |
| | 17 | 0,920 | 0,907 | 0,839 | 0,887 | 0,920 | 0,834 | 0,863 | 0,825 | 0,849 | 0,857 | 0,813 | 0,888 | 0,773 | 0,840 | 0,841 | 0,869 | 1,000 | 0,855 | 0,898 | 0,936 | **0,860** | Selecionado |
| | 18 | 0,894 | 0,869 | 0,849 | 0,891 | 0,878 | 0,829 | 0,879 | 0,791 | 0,798 | 0,873 | 0,748 | 0,873 | 0,823 | 0,800 | 0,792 | 0,875 | 0,855 | 1,000 | 0,887 | 0,891 | **0,871** | Selecionado |
| | 19 | 0,906 | 0,895 | 0,829 | 0,899 | 0,903 | 0,831 | 0,864 | 0,831 | 0,836 | 0,905 | 0,808 | 0,858 | 0,796 | 0,805 | 0,826 | 0,888 | 0,898 | 0,887 | 1,000 | 0,917 | **0,875** | Selecionado |
| | 20 | 0,937 | 0,909 | 0,847 | 0,916 | 0,941 | 0,865 | 0,883 | 0,850 | 0,842 | 0,900 | 0,831 | 0,895 | 0,811 | 0,855 | 0,859 | 0,930 | 0,936 | 0,891 | 0,917 | 0,000 | **0,887** | Selecionado |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Média da Medianas | | | 0,852 | |

O apêndice D traz a FMEA com os RPNs valendo-se dos índices dos especialistas selecionados para falhas humanas mecânicas; conforme proposto no método, somente são analisados os modos de falha com RPN>100. Destes 20 modos de falhas, 3 (M1, M2 e M3, abaixo abordados) possuem número de registros de tempos até a falha superiores a 20, possibilitando então a modelagem quantitativa e elaboração do plano de melhoria. Os demais modos de falhas (M4 ao M24) recebem um plano de melhoria sem modelagem de tempos até a falhas (visto que se deseja uma amostra superior a 20 observações para assegurar consistência no processo de modelagem). A modelagem quantitativa dos tempos até a falha dos modos M1, M2 e M3, bem como os planos de melhoria gerados para cada modo de falha preponderante, é apresentada nas seções que seguem. Os procedimentos computacionais para modelagem dos tempos até a falha foram operacionalizados no aplicativo Proconf.

### 4.1.1 Modo de Falha 1 (M1) - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional)

Inicialmente, testa-se a aderência de quatro distribuições estatísticas para 99 tempos até a falha do modo M1 - Desalinhamento da Correia do Transportador devido à Sobrecarga

na correia por falha operacional - utilizando os testes analíticos Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov (K-S), bem como o Papel de Probabilidade. São avaliadas as distribuições Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal. Na Figura 5 são apresentados os testes para o modo de falha M1.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 20,7689 | 41 | 36,5 | 0,55 |
| 20,7689 | 41,5379 | 20 | 23, | 0,40 |
| 41,5379 | 62,3068 | 17 | 14,5 | 0,41 |
| 62,3068 | 83,0757 | 2 | 9,2 | 5,62 |
| 83,0757 | 103,8447 | 3 | 5,8 | 1,35 |
| 103,8447 | 124,6136 | 7 | 3,7 | 3,06 |

$\chi^2$ = 14,95 com 8 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0602

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,0848  Nível de Significância = 0,0761

A hipótese de que a população segue o modelo Exponencial não pode ser rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 20,7689 | 41 | 37,9 | 0,25 |
| 20,7689 | 41,5379 | 20 | 22,4 | 0,26 |
| 41,5379 | 62,3068 | 17 | 13,9 | 0,67 |
| 62,3068 | 83,0757 | 2 | 8,8 | 5,28 |
| 83,0757 | 103,8447 | 3 | 5,6 | 1,23 |
| 103,8447 | 124,6136 | 7 | 3,6 | 3,18 |

$\chi^2$ = 14,46 com 7 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0436

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,0716  Nível de Significância = 0,2221

A hipótese de que a população segue o modelo Weibull é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 20,7689 | 41 | 43,1 | 0,11 |
| 20,7689 | 41,5379 | 20 | 22,7 | 0,31 |
| 41,5379 | 62,3068 | 17 | 11,3 | 2,86 |
| 62,3068 | 83,0757 | 2 | 6,5 | 3,09 |
| 83,0757 | 103,8447 | 3 | 4, | 0,27 |
| 103,8447 | 124,6136 | 7 | 2,7 | 6,88 |

$\chi^2$ = 21,65 com 7 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0029

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,0637  Nível de Significância = 0,2304

A hipótese de que a população segue o modelo Lognormal é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 20,7689 | 41 | 16, | 39,34 |
| 20,7689 | 41,5379 | 20 | 20,1 | 0,00 |
| 41,5379 | 62,3068 | 17 | 20,8 | 0,70 |
| 62,3068 | 83,0757 | 2 | 17,7 | 13,89 |
| 83,0757 | 103,8447 | 3 | 12,3 | 7,05 |
| 103,8447 | 124,6136 | 7 | 7, | 0,00 |

$\chi^2$ = 68,86 com 7 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0001

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,3158  Nível de Significância = 0,0001

A hipótese de que a população segue o modelo Normal é rejeitada.

Figura 5 – Testes de Aderência para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional)

Os testes possibilitam afirmar que os dados de falhas mecânicas para “Desalinhamento da Correia do Transportador por sobrecarga na correia por falha operacional” seguem o modelo Exponencial, enquanto que os modelos Weibull, Lognormal e Normal devem ser rejeitados.

Na sequência, avalia-se o papel de probabilidade gerado por cada distribuição estatística. Na Figura 6 são apresentados os papéis de probabilidade dos modelos Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal para o modo de falha M1 analisado. É possível verificar que a distribuição Exponencial se ajusta adequadamente aos dados de falhas mecânicas do modo M1; de tal forma, tal distribuição é utilizada para as análises subsequentes.

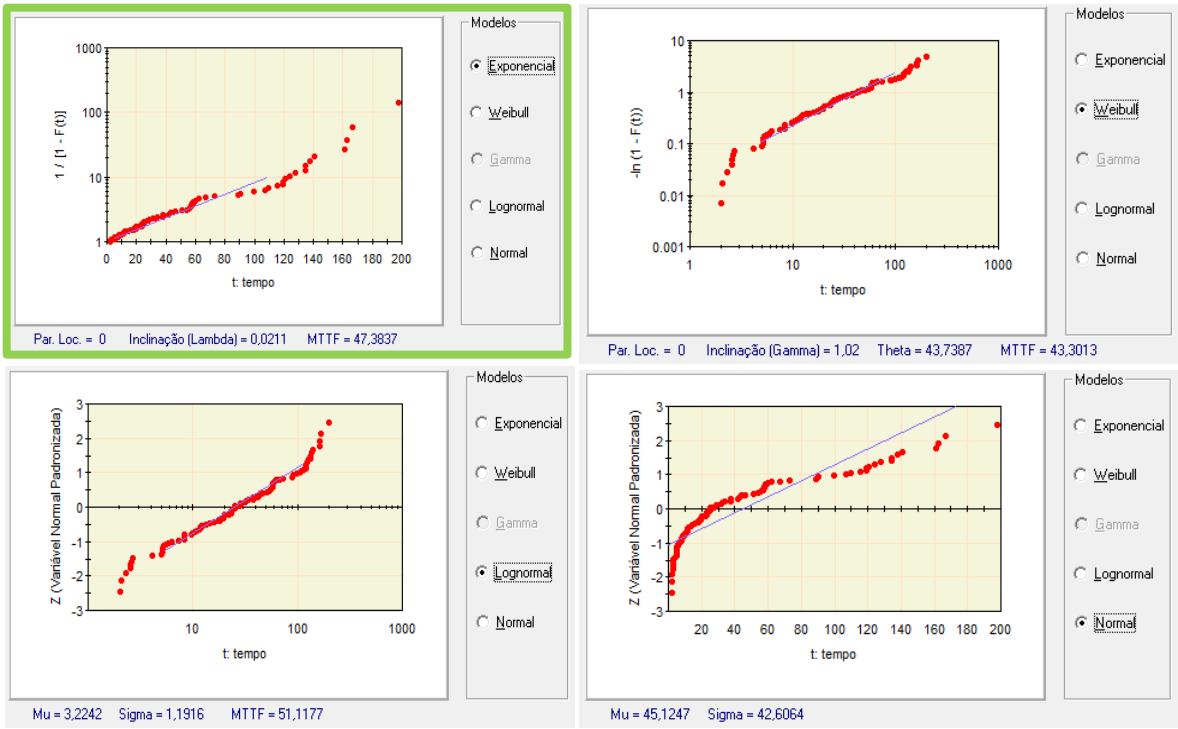



Figura 6 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador (sobrecarga na correia por falha operacional)

Após a definição da distribuição Exponencial para descrição dos tempos até a falhas de M1, gera-se o gráfico confiabilidade *R*(*t*), apresentado na Figura 7.

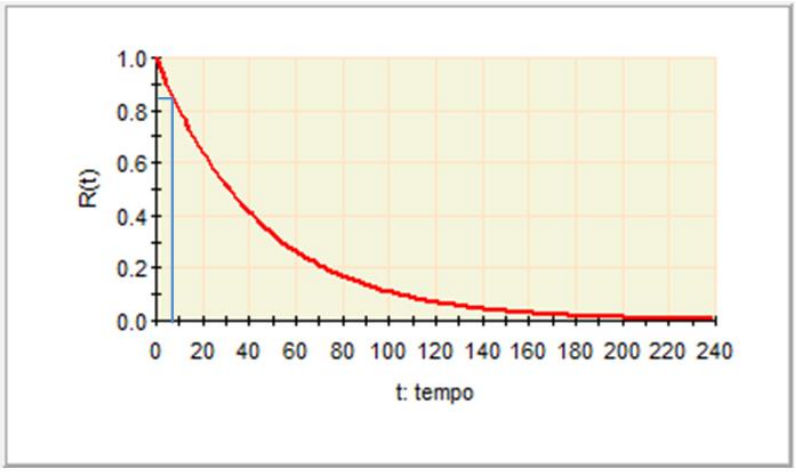
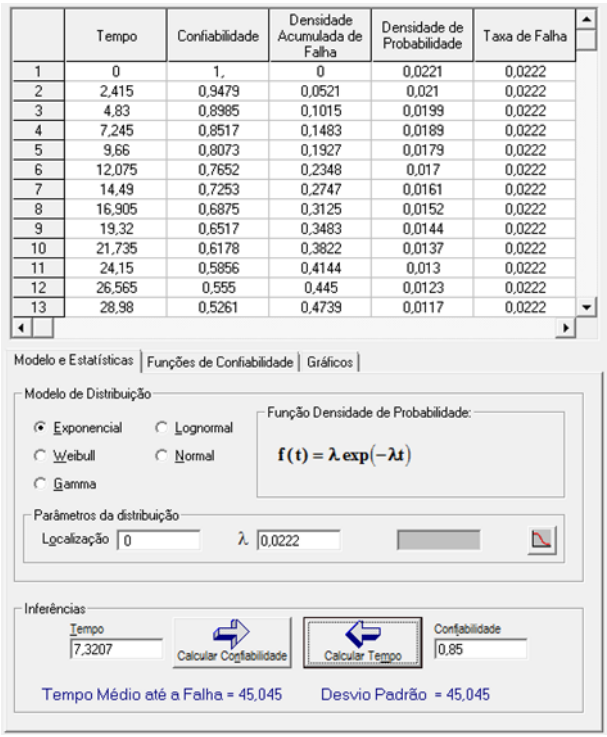



Figura 7 - Função de Confiabilidade (*R(t)*) para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional)

Observa-se que o perfil de confiabilidade apresenta característica de tendência de decréscimo muito acentuada nas primeiras 60 horas, evidenciando que falhas humanas

ocasionam o desalinhamento da correia do transportador em curtos intervalos de tempos depois da manutenção e retorno à operação da mesma. A partir de 60hs, verifica-se que a tendência decrescente da curva tende a suavizar.

Tendo-se em vista que se considera uma confiabilidade de 85% como a mínima necessária para o adequado funcionamento da correia (confiabilidade essa definida junto a especialistas de processo), recomenda-se uma avaliação, na prática, a cada 8h dos procedimentos operacionais ligados à correia para tratar eventuais desvios comportamentais associados à falta de percepção/execução do operador, conforme resultado apresentado na Figura 8. Estas falhas decorrem de erros na inspeção operacional (ou não realização da mesma), o que torna necessário a incumbência de um executante para realização da inspeção no equipamento para eliminação da mesma. Falta de competência ou habilidade técnica para exercício da atividade também contribuem para ocorrência da falha.



| | Tempo | Confiabilidade | Densidade Acumulada de Falha | Densidade de Probabilidade | Taxa de Falha |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1, | 0 | 0,0221 | 0,0222 |
| 2 | 2,415 | 0,9479 | 0,0521 | 0,021 | 0,0222 |
| 3 | 4,83 | 0,8985 | 0,1015 | 0,0199 | 0,0222 |
| 4 | 7,245 | 0,8517 | 0,1483 | 0,0189 | 0,0222 |
| 5 | 9,66 | 0,8073 | 0,1927 | 0,0179 | 0,0222 |
| 6 | 12,075 | 0,7652 | 0,2348 | 0,017 | 0,0222 |
| 7 | 14,49 | 0,7253 | 0,2747 | 0,0161 | 0,0222 |
| 8 | 16,905 | 0,6875 | 0,3125 | 0,0152 | 0,0222 |
| 9 | 19,32 | 0,6517 | 0,3483 | 0,0144 | 0,0222 |
| 10 | 21,735 | 0,6178 | 0,3822 | 0,0137 | 0,0222 |
| 11 | 24,15 | 0,5856 | 0,4144 | 0,013 | 0,0222 |
| 12 | 26,565 | 0,555 | 0,445 | 0,0123 | 0,0222 |
| 13 | 28,98 | 0,5261 | 0,4739 | 0,0117 | 0,0222 |



Figura 8 – Determinação da Confiabilidade para 85% - Desalinhamento da Correia do Transportador (Sobrecarga na correia por falha operacional)

Outra medida importante para determinação do intervalo de inspeção sugerido pela modelagem é o MTTF (Tempo Médio até a Falha). As falhas mecânicas relacionadas ao Desalinhamento da Correia do Transportador apresentam um MTTF de 45h, conforme

apresentado na Figura 8. De tal forma, percebe-se que, caso não sejam tomadas medidas de verificação da consistência e rigor dos procedimentos humanos relativos ao desalinhamento da correia do transportador, haverá uma falha a cada 45 horas de operação, em média.

Com vistas ao aprimoramento das operações associadas ao transportador de correia e redução das falhas motivadas por causas humanas, propõe-se agora uma série de ações de melhoria. Recomenda-se inicialmente a elaboração de um plano de intervenção para os modos de falhas humanas que apresentaram RPN>100. A estruturação e implementação do plano de melhorias para os modos de falhas humanas associadas ao desalinhamento da correia proporciona orientação das atividades de inspeção, operação e manutenção, elevando o nível de qualificação técnica dos executantes. Espera-se, com tais ações, redução de erros humanos, minimização de custos e elevação da disponibilidade física de ativos. O Quadro 10 detalha o plano de melhorias para o modo de falha M1, evidenciando os resultados esperados com tais ações. O mesmo foi estruturado com a participação de engenheiros, técnicos especializados, supervisores, analistas e psicólogas do setor de recursos humanos (RH) da empresa.

Quadro 10: Plano de Melhoria para Falha Mecânica - Desalinhamento da Correia do Transportador devido à sobrecarga na correia por falha operacional

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS MECÂNICAS (MODELADAS) | | |
|---|---|---|
| **O QUE CAUSA** | **AÇÃO** | **OBJETIVO** |
| Falha na Inspeção Operacional | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |
| | Realizar exercícios de ativação mental no início da jornada de trabalho | |
| | Priorizar regularmente temas específicos em DSS (antes do início da jornada de trabalho) que despertem o interesse pelo cuidado a saúde, pelos os riscos associados ao consumo de álcool e drogas e os programas sociais oferecidos pela empresa. | Estimular a auto avaliação e as boas práticas fora do ambiente do trabalho entendendo que a mesma afeta o desempenho profissional. |
| | Sistematizar o cadastro (inserção) das conformidades e não conformidades identificadas durante a verificação em campo identificando o responsável pela mesma a fim de possibilitar extração de relatórios periódicos. | Valorizar o trabalho realizado na área gerando banco de dados personalizados. |
| Falta de conhecimento | Realizar levantamento das competências técnicas e avaliação das mesmas | Identificar *gaps* na formação profissional e estabelecer estratégias de desenvolvimento de habilidades. |
| | Considerar no plano de desenvolvimento do empregado a execução de cursos de gerenciamento da rotina voltado a Impactos das Paradas no Programa de Produção | Capacitar o empregado para analisar a gestão da rotina e utilização de metodologias para identificar falhas, oportunidades de melhoria e despertar o senso de responsabilidade. |
| | Considerar no plano de desenvolvimento do empregado a execução de cursos de Gestão de Risco em Saúde e Segurança direcionado ao Estudo de Perigos e Operabilidade. | Capacitar para o reconhecimento e análise de desvios de processos visando a proposição de medidas e controles, e formas de eliminação ou redução de riscos, além de promover a percepção de riscos no ambiente de trabalho. |

Complementarmente ao exposto no Quadro 10, percebe-se que o modo de falha em questão apresenta um MTTF muito baixo (ver Figura 6) quando comparado com os demais modos de falha modelados (apresentados na sequência), demandando ações de controle mais frequentes (diária ou semanal). A sistematização da inspeção operacional com a aplicação de lista de verificação constando de itens estratégicos para a observação dos fatores que favorecem o desalinhamento da correia por falha operacional contribui, de maneira significativa, para redução deste modo de falha. Partindo do pressuposto que a inspeção operacional é uma atividade cotidiana, entende-se que o uso do *cheklist* nas rotas de turno será uma medida eficaz para inibir esquecimentos e falta de atenção.

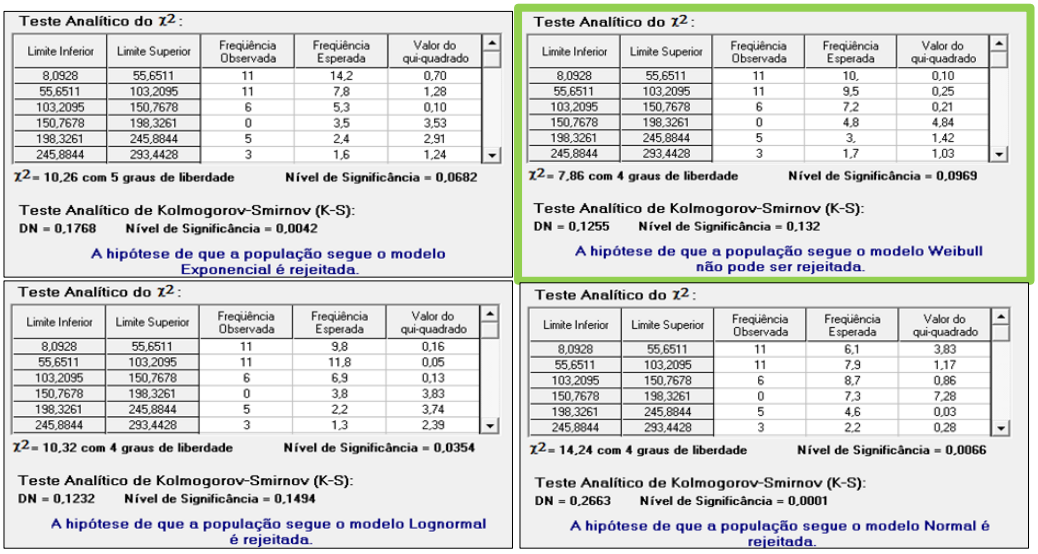
Para implementação desta rotina, enfatiza-se a necessidade de adequação do procedimento operacional já existente na empresa - Inspecionar Pátios de Estocagem (PRO 12642) - com a inclusão de atividades de inspeção em correias transportadoras, chutes de descarga e verificação de vazão de material para identificação e correção de desvios operacionais em tempo hábil. Estas ações podem ser facilmente implementadas pelos Orientadores Técnicos Operacionais e Supervisores Operacionais.

A sistematização de listas de verificação e quantificação das mesmas pode ainda auxiliar na identificação dos principais desvios causados por falhas humanas operacionais ou de manutenção. Sugere-se apuração e tratativa computacional dos dados coletados via *cheklists*.

Exercícios de ativação mental no início da jornada de trabalho (Diálogos de Saúde e Segurança – DSS específicos) também são recomendados, pois ajudam a manter o estado de alerta e identificar comportamentos associados à falta de concentração. Quando bem estruturadas, estas ações auxiliam na identificação de comportamentos não seguros, na melhor distribuição de tarefas e aumentam a percepção de risco do colaborador, eleva o nível de confiança entre líder e subordinados. Estas atividades podem ser executadas com frequência semanal pelo primeiro nível de liderança (supervisão), antes do início das rotas de inspeção.

### 4.1.2 Modo de Falha 2 (M2) - Quebra de Rolete (limpeza inadequada)

Para o modo de falha M2 - Quebra de Rolete por limpeza inadequada - a aderência das quatro distribuições (Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal) é avaliada utilizando os testes analíticos Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov (K-S), bem como o Papel de Probabilidade. Na Figura 9 são representados os testes para as distribuições do modo de falha M2.



Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 8,0928 | 55,6511 | 11 | 14,2 | 0,70 |
| 55,6511 | 103,2095 | 11 | 7,8 | 1,28 |
| 103,2095 | 150,7678 | 6 | 5,3 | 0,10 |
| 150,7678 | 198,3261 | 0 | 3,5 | 3,53 |
| 198,3261 | 245,8844 | 5 | 2,4 | 2,91 |
| 245,8844 | 293,4428 | 3 | 1,6 | 1,24 |

$\chi^2$ = 10,26 com 5 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0682

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1768  Nível de Significância = 0,0042

A hipótese de que a população segue o modelo Exponencial é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 8,0928 | 55,6511 | 11 | 10, | 0,10 |
| 55,6511 | 103,2095 | 11 | 9,5 | 0,25 |
| 103,2095 | 150,7678 | 6 | 7,2 | 0,21 |
| 150,7678 | 198,3261 | 0 | 4,8 | 4,84 |
| 198,3261 | 245,8844 | 5 | 3, | 1,42 |
| 245,8844 | 293,4428 | 3 | 1,7 | 1,03 |

$\chi^2$ = 7,86 com 4 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0969

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1255  Nível de Significância = 0,132

A hipótese de que a população segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 8,0928 | 55,6511 | 11 | 9,8 | 0,16 |
| 55,6511 | 103,2095 | 11 | 11,8 | 0,05 |
| 103,2095 | 150,7678 | 6 | 6,9 | 0,13 |
| 150,7678 | 198,3261 | 0 | 3,8 | 3,83 |
| 198,3261 | 245,8844 | 5 | 2,2 | 3,74 |
| 245,8844 | 293,4428 | 3 | 1,3 | 2,39 |

$\chi^2$ = 10,32 com 4 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0354

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1232  Nível de Significância = 0,1494

A hipótese de que a população segue o modelo Lognormal é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 8,0928 | 55,6511 | 11 | 6,1 | 3,83 |
| 55,6511 | 103,2095 | 11 | 7,9 | 1,17 |
| 103,2095 | 150,7678 | 6 | 8,7 | 0,86 |
| 150,7678 | 198,3261 | 0 | 7,3 | 7,28 |
| 198,3261 | 245,8844 | 5 | 4,6 | 0,03 |
| 245,8844 | 293,4428 | 3 | 2,2 | 0,28 |

$\chi^2$ = 14,24 com 4 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0066

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,2663  Nível de Significância = 0,0001

A hipótese de que a população segue o modelo Normal é rejeitada.

Figura 9 – Testes de Aderência para Falha Mecânica - Quebra de Rolete (limpeza inadequada)

Foram modelados 38 dados; os testes permitem afirmar que os dados de falhas mecânicas motivadas por falhas humanas para “Quebra de Rolete por limpeza inadequada”

seguem o modelo Weibull, enquanto que os modelos Exponencial, Lognormal e Normal devem ser rejeitados.

A etapa seguinte avalia a aderência das distribuições candidatas ao papel de probabilidade; na Figura 10 é possível visualizar os gráficos dos modelos Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal, para o modo de falha analisado. A análise visual do papel de probabilidade sugere que o modelo Weibull se ajusta adequadamente aos dados de falhas mecânicas, sendo então utilizado nas análises subsequentes relacionadas à Quebra de Rolete por limpeza inadequada.

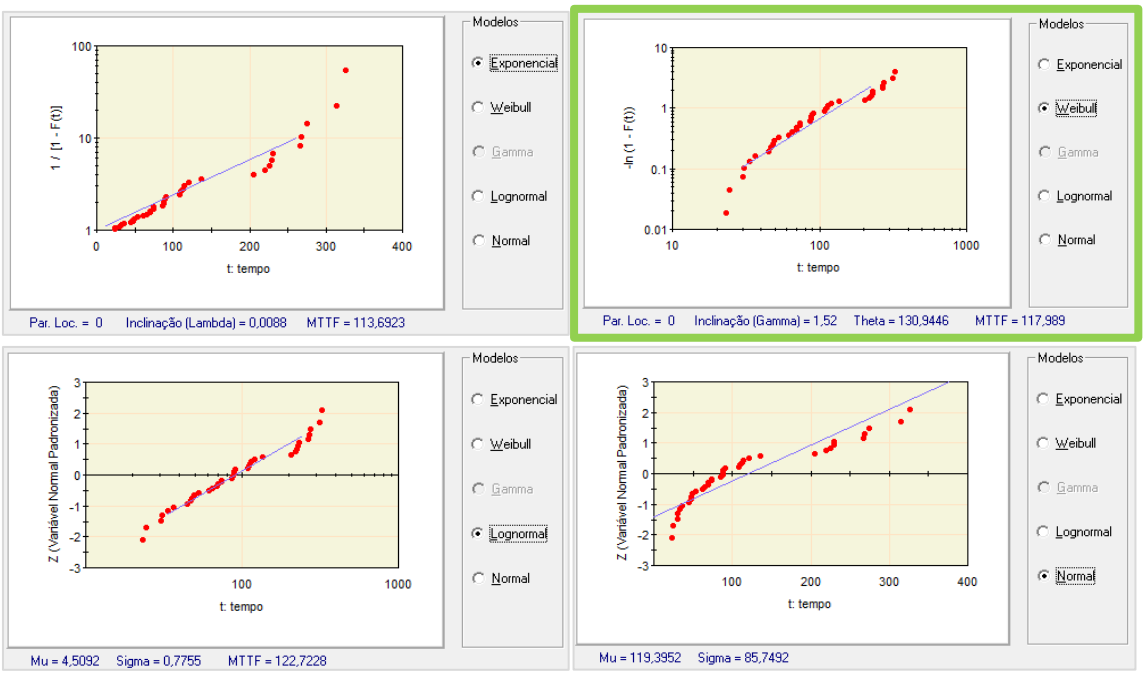



Figura 10 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Mecânica - Quebra de Rolete (limpeza inadequada)

Com o modelo de distribuição definido, gera-se o gráfico de confiabilidade *R*(t), na Figura 11. Pode-se observar que o perfil de confiabilidade apresenta decréscimo muito acentuado nas primeiras 150 horas; a partir de então, a curva começa a suavizar, e a diminuição da confiabilidade do procedimento já não é muito acentuada. Sob a ótica de falhas humanas, este evento pode estar associado à ausência de rotinas consolidadas de limpeza ou baixa eficiência da mesma, o que acarreta acúmulo de material, travamento do rolete, desgaste prematuro da carcaça ou quebra de rolamento. Adicionalmente, falhas de controle operacional também podem gerar sobrecargas e fuga de material, elevando a probabilidade de contaminação, travamento e avaria do componente.

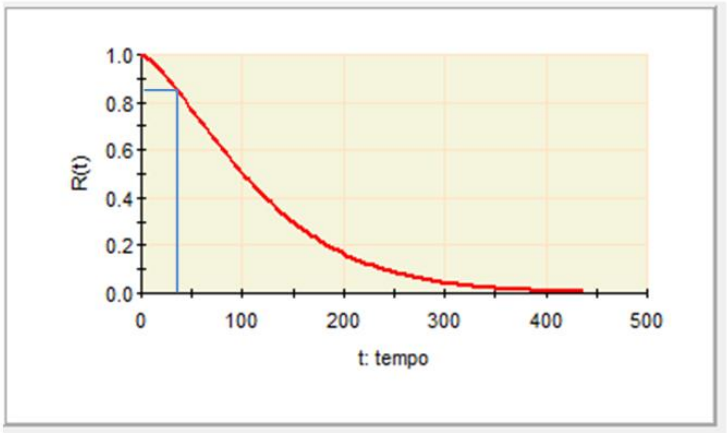
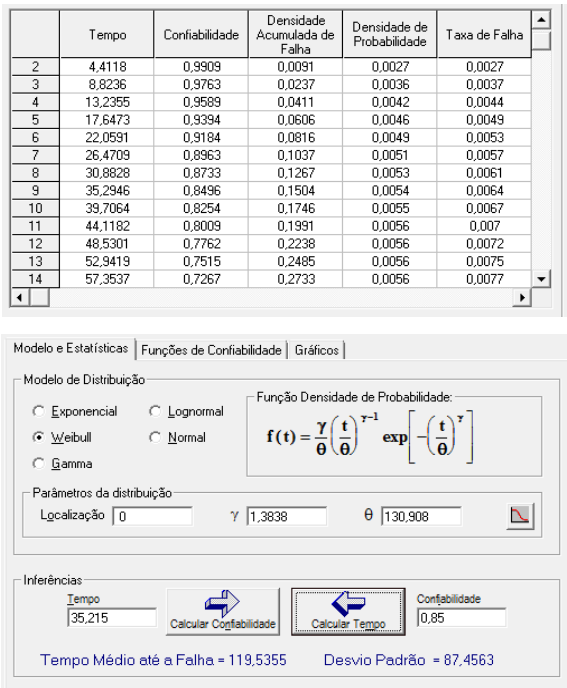



Figura 11 – Função de Confiabilidade (*R(t)*) para Falha Mecânica - Quebra de Rolete (limpeza inadequada)

Para assegurar uma confiabilidade mínima de 85% (definida em conjunto com especialistas de processo), recomenda-se a realização de inspeção a cada 36 horas (ver Figura 12) para tratar falhas humanas relacionadas à contaminação do componente, ausência de limpeza industrial, baixa qualidade do serviço executado, falha na execução da rotina operacional e pressa na execução da tarefa, dentre outras.



| | Tempo | Confiabilidade | Densidade Acumulada de Falha | Densidade de Probabilidade | Taxa de Falha |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 4,4118 | 0,9909 | 0,0091 | 0,0027 | 0,0027 |
| 3 | 8,8236 | 0,9763 | 0,0237 | 0,0036 | 0,0037 |
| 4 | 13,2355 | 0,9589 | 0,0411 | 0,0042 | 0,0044 |
| 5 | 17,6473 | 0,9394 | 0,0606 | 0,0046 | 0,0049 |
| 6 | 22,0591 | 0,9184 | 0,0816 | 0,0049 | 0,0053 |
| 7 | 26,4709 | 0,8963 | 0,1037 | 0,0051 | 0,0057 |
| 8 | 30,8828 | 0,8733 | 0,1267 | 0,0053 | 0,0061 |
| 9 | 35,2946 | 0,8496 | 0,1504 | 0,0054 | 0,0064 |
| 10 | 39,7064 | 0,8254 | 0,1746 | 0,0055 | 0,0067 |
| 11 | 44,1182 | 0,8009 | 0,1991 | 0,0056 | 0,007 |
| 12 | 48,5301 | 0,7762 | 0,2238 | 0,0056 | 0,0072 |
| 13 | 52,9419 | 0,7515 | 0,2485 | 0,0056 | 0,0075 |
| 14 | 57,3537 | 0,7267 | 0,2733 | 0,0056 | 0,0077 |



Figura 12 – Determinação da Confiabilidade para 85% - Quebra de Rolete (limpeza inadequada)

Por fim, percebe-se que as falhas relacionadas à Quebra de Rolete apresentam um MTTF de 120h, sendo esse o tempo médio esperado para uma falha decorrente de limpeza inadequada.

Para aperfeiçoamento das operações associadas à manutenção do rolete, é proposto um plano de melhorias para os modos de falhas humanas que apresentaram RPN>100. Este plano proporciona uma adequação de rotinas operacionais, de manutenção e verificação de eficiência da mesma para reduzir os erros humanos relacionados à percepção e atenção necessária para o exercício da atividade. O Quadro 11 apresenta o plano de melhoria para a falha em questão. A elaboração do plano de melhoria contou com a participação dos especialistas selecionados (engenheiros, supervisores, técnicos e mecânicos), analistas e psicólogas do setor de RH.

Quadro 11: Plano de Melhoria para Falha Mecânica - Quebra de Rolete devido à limpeza inadequada

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS MECÂNICAS (MODELADAS) | | |
|---|---|---|
| **O QUE CAUSA** | **AÇÃO** | **OBJETIVO** |
| Falta ou falha na execução da rotina operacional | Definir padrões de qualidade em processos de limpeza industrial (imagens com referências de padrões desejados) e treinar os executantes para a atividade. | Desenvolver habilidades e sensos de limpeza e organização de área. |
| Baixa Motivação | Estimular a comunicação compartilhando conhecimentos técnicos e estabelecer planos para desenvolvimento de carreiras concedendo feedbacks estruturados regularmente. | Identificar perfis e adequá-los melhor as atividades/funções. Reduzir/eliminar acomodação à rotina (zona de conforto) gerando desenvolvimento de novas competências e habilidades técnicas. |
| | Mapear as condições inadequadas dos ambientes e postos de trabalho e elaborar plano para eliminação das não-conformidades - envolver a equipe nesta atividade. | |
| | Realizar rotatividade em atividades para estimular o desenvolvimento profissional e crescimento da equipe (se possível montar cronograma com escalas, funções e responsabilidades - estar atento as responsabilidades de cada cargo) | |
| Pressa na execução da tarefa | Identificação de perfil adequado para execução de atividades sob pressão em curto período de tempo através de ferramentas comportamentais e testes psicológicos. | Estruturar equipe considerando perfis e suas habilidades. |
| Falta de conhecimento | Realizar levantamento das competências técnicas e avaliação das mesmas | Identificar *gaps* na formação profissional e estratégias de desenvolvimento de habilidades |
| | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado o treinamento em Gestão de Perdas de Produto e Limpeza industrial | Apresentar, in loco, o processo de limpeza industrial e controle de perdas utilizados nas instalações industriais da Vale. |
| | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado a qualificação em Gestão e Tecnologia da Qualidade. | Aprimorarar/desenvolver técnicas para planejamento e análise da qualidade, gestão das operações e dos processos aguçando a percepção para a melhoria contínua e padrões de 5"S". |

A baixa qualificação técnica, associada à falta de habilidade do operador, contribui para a execução ineficaz do procedimento de limpeza do rolete. Entende-se que a análise

anual do Plano de Desenvolvimento do Empregado (visando ao estabelecimento de padrões de qualidade em processos de limpeza industrial), bem como a execução de treinamentos relacionados à gestão de perdas e tecnologia de qualidade, poderão reduzir substancialmente as causas das falhas humanas que comprometem a eficiência do rolete. Vislumbra-se a implementação desta ação de maneira conjunta entre áreas operacionais e recursos humanos (RH), correlacionando perfis profissionais e lacunas de habilidades técnicas com a utilização de ferramentas comportamentais e testes psicológicos.

Aspectos associados à motivação também podem comprometer a produtividade da equipe, visto que a limpeza industrial é uma atividade rotineira e que não exige alta qualificação técnica. A promoção de rotatividade (*job rotation*) favorece crescimento individual e coletivo. Escalas mensais podem ser entendidas como adequadas para tal ação e podem ser facilmente implementadas pela equipe supervisora da atividade.

### 4.1.3 Modo de Falha 3 (M3) - Rasgo da Correia do Transportador (ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção ou falha na montagem de guias laterais na saída de chutes)

De forma similar às análises anteriores, a aderência das quatro distribuições (Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal) é avaliada para o modo de falha M3 - Rasgo da Correia do Transportador por ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e falha na montagem de guias laterais na saída de chutes. A Figura 13 apresenta os resultados dos testes analíticos; foram modelados 51 tempos até a falha, permitindo afirmar que os dados de falhas mecânicas para “Rasgo da Correia do Transportador” seguem o modelo Weibull (sendo rejeitados os modelos Exponencial, Lognormal e Normal).

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 38,0143 | 29 | 22, | 2,26 |
| 38,0143 | 76,0286 | 7 | 12,5 | 2,42 |
| 76,0286 | 114,0429 | 3 | 7,1 | 2,38 |
| 114,0429 | 152,0572 | 3 | 4,1 | 0,27 |
| 152,0572 | 190,0715 | 4 | 2,3 | 1,24 |
| 190,0715 | 228,0858 | 1 | 1,3 | 0,08 |

$\chi^2$= 15,42 com 6 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0172

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1831  Nível de Significância = 0,0002

A hipótese de que a população segue o modelo Exponencial é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 38,0143 | 29 | 25,9 | 0,36 |
| 38,0143 | 76,0286 | 7 | 10,1 | 0,93 |
| 76,0286 | 114,0429 | 3 | 5,5 | 1,14 |
| 114,0429 | 152,0572 | 3 | 3,3 | 0,03 |
| 152,0572 | 190,0715 | 4 | 2,1 | 1,84 |
| 190,0715 | 228,0858 | 1 | 1,3 | 0,08 |

$\chi^2$= 9,99 com 5 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0754

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,0967  Nível de Significância = 0,1871

A hipótese de que a população segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 38,0143 | 29 | 29, | 0,00 |
| 38,0143 | 76,0286 | 7 | 9, | 0,46 |
| 76,0286 | 114,0429 | 3 | 4,2 | 0,35 |
| 114,0429 | 152,0572 | 3 | 2,4 | 0,16 |
| 152,0572 | 190,0715 | 4 | 1,5 | 4,12 |
| 190,0715 | 228,0858 | 1 | 1, | 0,00 |

$\chi^2$= 13,59 com 5 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0184

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,088  Nível de Significância = 0,2246

A hipótese de que a população segue o modelo Lognormal é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 38,0143 | 29 | 10, | 36,00 |
| 38,0143 | 76,0286 | 7 | 11,9 | 2,03 |
| 76,0286 | 114,0429 | 3 | 11,3 | 6,13 |
| 114,0429 | 152,0572 | 3 | 8,6 | 3,66 |
| 152,0572 | 190,0715 | 4 | 5,2 | 0,29 |
| 190,0715 | 228,0858 | 1 | 2,5 | 0,92 |

$\chi^2$= 54,15 com 5 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0001

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,3943  Nível de Significância = 0,0001

A hipótese de que a população segue o modelo Normal é rejeitada.

Figura 13 – Testes de Aderência para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e falha na montagem de guias laterais na saída de chutes)

A etapa que segue avalia a proximidade dos dados modelados em relação à reta sugerida para as distribuições em estudo por intermédio do Papel de Probabilidade. Na Figura 14 é possível observar que a distribuição de Weibull modela adequadamente o modo de falha M3, sendo então utilizado nas análises subsequentes relacionadas a Rasgo da Correia do Transportador por ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e falha na montagem de guias laterais na saída de chutes.

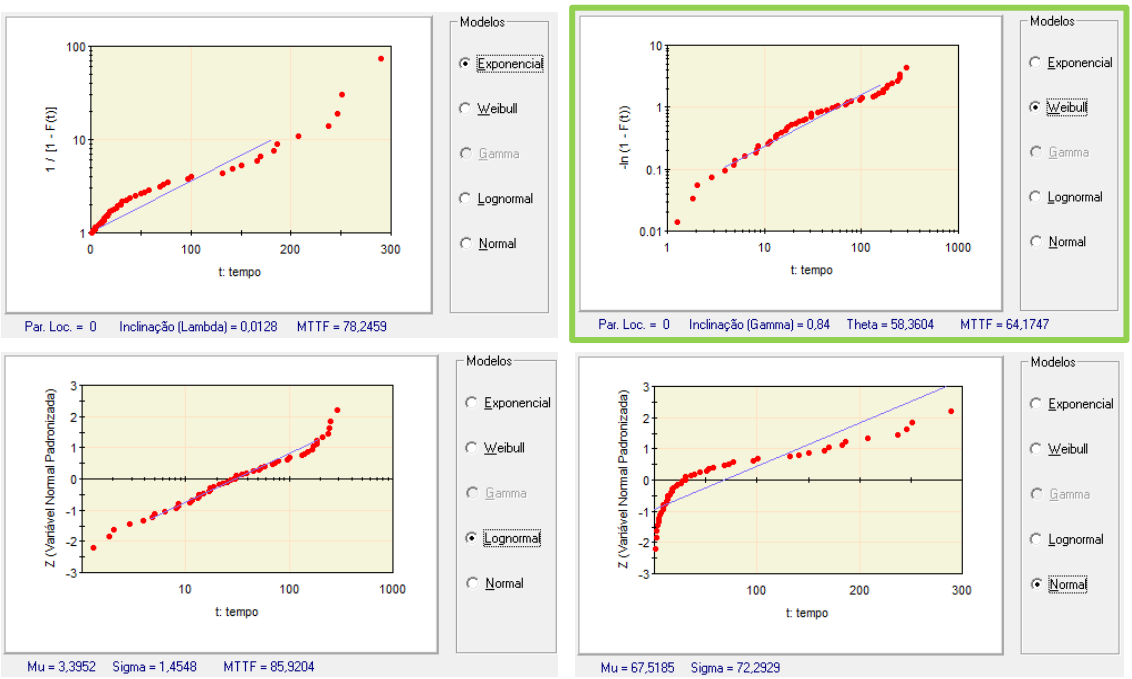



Figura 14 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e falha na montagem de guias laterais na saída de chutes)

Na Figura 15 é possível visualizar o gráfico de função de confiabilidade (*R(t)*) para os dados modelados. Para as primeiras 100 horas, o perfil de confiabilidade apresenta acentuada tendência de decréscimo. Para tempos superiores 100 horas, a curva começa a suavizar e a diminuição da confiabilidade do equipamento já não é muito acentuada.

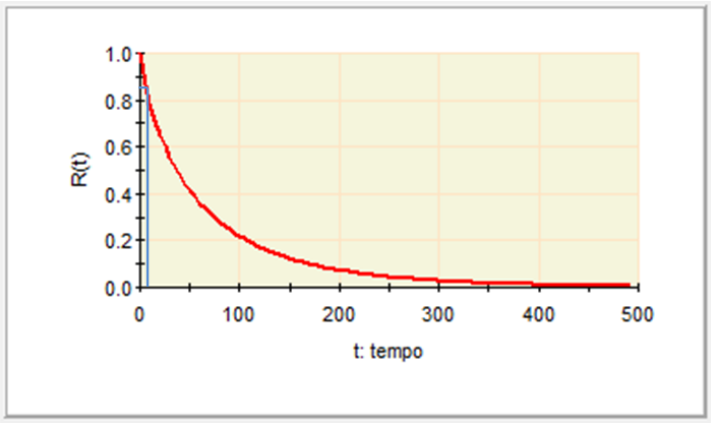
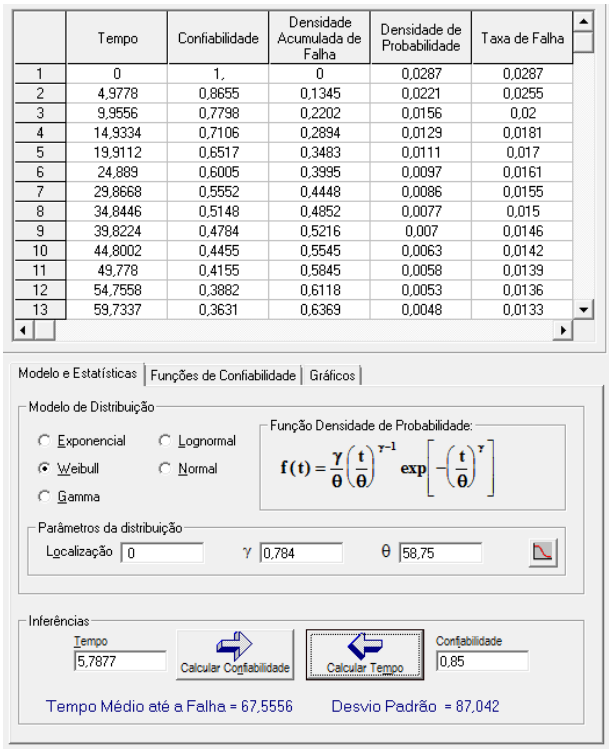



Figura 15 –Função de Confiabilidade (R(*t*)) para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (Ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e Falha na montagem de guias laterais na saída de chutes)

Conforme a Figura 16, considerando uma confiabilidade de 85%, o intervalo entre verificações recomendado para evitar a ocorrência da falha é 6h. Este tempo remete a atividades bastante frequentes de inspeção operacional. Sugere-se a designação de um colaborador para realização desta atividade, em cada turno de trabalho, para tratativa deste modo de falha.



| | Tempo | Confiabilidade | Densidade Acumulada de Falha | Densidade de Probabilidade | Taxa de Falha |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1, | 0 | 0,0287 | 0,0287 |
| 2 | 4,9778 | 0,8655 | 0,1345 | 0,0221 | 0,0255 |
| 3 | 9,9556 | 0,7798 | 0,2202 | 0,0156 | 0,02 |
| 4 | 14,9334 | 0,7106 | 0,2894 | 0,0129 | 0,0181 |
| 5 | 19,9112 | 0,6517 | 0,3483 | 0,0111 | 0,017 |
| 6 | 24,889 | 0,6005 | 0,3995 | 0,0097 | 0,0161 |
| 7 | 29,8668 | 0,5552 | 0,4448 | 0,0086 | 0,0155 |
| 8 | 34,8446 | 0,5148 | 0,4852 | 0,0077 | 0,015 |
| 9 | 39,8224 | 0,4784 | 0,5216 | 0,007 | 0,0146 |
| 10 | 44,8002 | 0,4455 | 0,5545 | 0,0063 | 0,0142 |
| 11 | 49,778 | 0,4155 | 0,5845 | 0,0058 | 0,0139 |
| 12 | 54,7558 | 0,3882 | 0,6118 | 0,0053 | 0,0136 |
| 13 | 59,7337 | 0,3631 | 0,6369 | 0,0048 | 0,0133 |



Figura 16 – Determinação da Confiabilidade para 85% - Rasgo da Correia do Transportador (Ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e Falha na montagem de guias laterais na saída de chutes)

Para aprimoramento das operações relativas ao rasgo de correia do transportador ocasionado por esquecimento e erros de montagens, recomenda-se a estruturação e implementação do plano de melhorias associadas aos sensos de organização, limpeza e utilização. Observa-se, também, que a promoção de disciplina operacional em atividades de inspeção sensitiva e manutenção preventiva constitui-se em ação efetiva. Pode-se ainda utilizar *cheklists* para identificação "do que fazer" para evitar esquecimentos, além da proposição de ações que combatam pressão, estresse e fadiga, os quais podem potencializar erros humanos em atividades que demandam concentração. O Quadro 12 detalha o plano de melhoria para o modo de falha em questão. Psicólogas, analistas de RH, engenheiros e técnicos especializados contribuíram para a elaboração deste plano de melhorias.

Quadro 12: Plano de Melhoria para Falha Mecânica - Rasgo da Correia do Transportador (Ferramentas/materiais esquecidos durante a manutenção e Falha na montagem de guias laterais na saída de chutes)

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS MECÂNICAS (MODELADAS) | | |
|---|---|---|
| **O QUE CAUSA** | **AÇÃO** | **OBJETIVO** |
| Esquecimento, negligencia. | Criar rotinas de execução de tarefas incluindo *checklist* no final das atividades. Sugere-se a criação de lista de verificação no cartão de tempo ou no Project (verso as folha) tornando como obrigatório o seu preenchimento antes da liberação do equipamento. | Educar executante na aplicação de ferramentas de qualidade (5"S", por exemplo) para evitar que falhas elementares associadas aos sensos de organização, utilização e limpeza sejam negligenciados em frentes de serviço. |
| | Definir equipes e responsabilidades antes do início da execução dos serviços e promover a rotatividade entre os integrantes. | Levar o executante a planejar, antecipadamente, suas ações frente as tarefas a serem executadas proporcionando uma gestão participativa antes e durante a execução. |
| Pressa na execução da atividade | Identificação de perfil adequado para execução de atividades sob pressão em curto período de tempo através de ferramentas comportamentais e testes psicológicos. | Estruturar equipe considerando suas habilidades. |
| Baixa percepção de risco | Considerar no plano de desenvolvimento do empregado a execução de cursos de Gestão de Risco em Saúde e Segurança direcionado ao Estudo de Perigos e Operabilidade. | Capacitar para o reconhecimento e análise de desvios de processos visando a proposição de medidas e controles, e formas de eliminação ou redução de riscos, além de promover a percepção de riscos no ambiente de trabalho. |
| Falta de conhecimento | Realizar levantamento das competências técnicas e avaliação das mesmas | Identificar *gaps* na formação profissional e estratégias de desenvolvimento de habilidades |
| | Considerar no plano de desenvolvimento do empregado a execução de cursos de gerenciamento da rotina voltado a Impactos das Paradas no Programa de Produção | Capacitar o empregado para analisar a gestão da rotina e utilização de metodologias para identificar falhas e oportunidades de melhoria e despertar o senso de responsabilidade. |

Esquecimento, negligência e pressa são causas que merecem atenção para este modo de falha. A criação de rotinas de execução de atividades, munidas de listas de verificação a serem preenchidas imediatamente após a conclusão das ordens de manutenção, se mostra como alternativa eficaz para mitigação desta falha humana. Entende-se como fundamental a criação de uma cultura de organização e disciplina operacional, de maneira que os executantes sintam-se responsáveis pelo cumprimento dos procedimentos operacionais e garantam a segurança e integridade física das pessoas e dos equipamentos. Torna-se importante que esta ação esteja presente na rotina diária de cada equipe executante da ordem de manutenção, de forma que a mesma possa preencher e entregar à supervisão o *checklist* de verificação antes do retorno do equipamento à operação.

Como mencionado anteriormente, os 3 modos de falha acima apresentaram RPN>100 e dispunham de quantidade suficiente de tempos até a falhas para que uma modelagem

quantitativa de confiabilidade fosse realizada. Outros modos com RPN>100 não dispunham de quantidade mínima de tempos até a falha para modelagem; no entanto, um plano de melhoria também é apresentado para tais modos, tendo-se em vista que as causas destas falhas devem ser endereçadas para assegurar adequada operação do sistema; esse plano é apresentado no Quadro 13. Semelhantemente aos planos estruturados para as falhas modeladas, a estruturação do mesmo teve a contribuição de especialista das áreas (engenheiros, supervisores, inspetores, técnicos, analistas e psicólogos do setor de RH).

Quadro 13: Plano de Melhoria para Falhas Mecânicas não modeladas com RPN>100

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS MECÂNICAS (NÃO MODELADAS) | | | |
|---|---|---|---|
| **MODO DE FALHA NÃO MODELADO** | **O QUE CAUSA** | **AÇÃO** | **OBJETIVO** |
| Rolamento Danificado do Motor Elétrico devido montagem inadequada de componentes | Falta de atenção, falta concentração, conhecimento. | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado o treinamento em Gestão para Resultados e Tomada de Decisão | Analisar os impactos de decisões e ações, por meio da utilização de visão sistêmica e do conhecimento do negócio, para mitigar riscos e maximizar oportunidades de melhoria e fornecer padrões sistemáticos e técnicos para o desenvolvimento da capacidade de tomar decisões. |
| Rolamento Danificado do Redutor do Truque de Locomoção por Lubrificante Inadequado | Falta de atenção | Criar identificação de tipo de lubrificante e suas características para cada equipamento com identificação in-loco. | Possibilitar a identificação visual do tipo de lubrificante e suas características para os ativos. |
| Rolamento Danificado do Redutor do Truque de Locomoção por falha na montagem. | Falta de conhecimento e habilidade técnica, desatenção. | Definir padrões técnicos para montagem de rolamentos e elaborar matriz de treinamento para equipe.<br>Proporcionar rotatividade no time para desenvolvimento de habilidades técnicas | Obtenção de colaboradores mais hábeis no exercício da atividade |
| Rolamento Danificado do Redutor do Truque degradação química do lubrificante. | Falha na execução da rotina operacional | Criar planos de manutenção preventiva e sistematizá-los. | Agir proativamente evitando a falha |
| Travamento do Rolete de Carga devido limpeza inadequada | Falta ou falha na execução da rotina operacional | Definir padrões de qualidade em processos de limpeza industrial (imagens com referências de padrões desejados) e treinar os executantes para a atividade. | Desenvolver habilidades e sensos de limpeza e organização de área. |
| Defeito Emenda da Correia do Transportador por tempo de cura insuficiente | Pressa na execução da tarefa | Identificação de perfil adequado para execução de atividades sob pressão em curto período de tempo através de ferramentas comportamentais e testes psicológicos. | Estruturar equipe considerando suas habilidades. |
| Defeito Emenda da Correia do Transportador por aplicação de produtos inadequados | Falta de atenção | Criar identificação de tipo de produto para cada aplicação. Treinar equipe no que se refere a utilização. | Possibilitar a identificação visual do tipo de lubrificante e suas características para os ativos. |
| Defeito Emenda da Correia do Transportador por falta de limpeza da superfície | Falta de Conhecimento e Disciplina Operacional. | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado a qualificação em Gestão e Tecnologia da Qualidade. | Aprimorarar/desenvolver técnicas para planejamento e análise da qualidade, gestão das operações e dos processos aguçando a percepção para a melhoria contínua e padrões de 5"S". |

Quadro 14: Plano de Melhoria para Falhas Mecânicas não modeladas com RPN>100 (continuação)

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS MECÂNICAS (NÃO MODELADAS) | | | |
|---|---|---|---|
| MODO DE FALHA NÃO MODELADO | O QUE CAUSA | AÇÃO | OBJETIVO |
| Baixa Pressão no Sistema de Lubrificação por contaminação do Lubrificante | Falta de atenção, concentração, conhecimento. | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado a qualificação em Gestão e Tecnologia da Qualidade. | Aprimorar/desenvolver técnicas para planejamento e análise da qualidade, gestão das operações e dos processos aguçando a percepção para a melhoria contínua e padrões de 5"S". |
| Baixa Pressão no Sistema de Lubrificação devido substituição inadequada de componentes (ex: Distribuidor). | Falta de atenção, falta concentração, conhecimento. | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado o treinamento em Gestão para Resultados e Tomada de Decisão | Analisar os impactos de decisões e ações, por meio da utilização de visão sistêmica e do conhecimento do negócio, para mitigar riscos e maximizar oportunidades de melhoria e fornecer padrões sistemáticos e técnicos para o desenvolvimento da capacidade de tomar decisões. |
| Desgaste do Acoplamento Hidráulico (Hidrodinâmico) por Falha no Torque dos parafusos | Falta de conhecimento e uso de ferramentas inadequadas | Definir padrões de utilização de ferramentas conforme demandas e treinar executantes nos padrões. | Ter mapeamento e definição das ferramentas certas para cada atividade e instruir colaboradores quanto a utilização da mesma |
| Desgaste do Acoplamento Hidráulico (Hidrodinâmico) por reposição inadequada na quantidade e tipo de lubrificante (Máximo/Mínimo) | Falta de atenção e disciplina operacional (Rotina) | Definir padrão para execução da atividade. Treinar todos os envolvidos no padrão. | Desenvolver novas competências na equipe. |
| Desgaste do Rolete de Carga devido sobrecarga (Falha operacional) | Falha no cumprimento da rotina operacional. | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |
| Fixação inadequada do Redutor do Truque de Locomoção devido substituição de componentes subdimensionados (Parafusos) | Falta de conhecimento e uso de componentes inadequados. | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado o treinamento em Gestão para Resultados e Tomada de Decisão | Analisar os impactos de decisões e ações, por meio da utilização de visão sistêmica e do conhecimento do negócio, para mitigar riscos e maximizar oportunidades de melhoria e fornecer padrões sistemáticos e técnicos para o desenvolvimento da capacidade de tomar decisões. |
| Quebra da Estrutura por sobrecarga (Falha Operacional) | Falta de atenção e disciplina operacional (Rotina) | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |
| Quebra de estrutura devido choque mecânico - máquina na pilha) - falha operacional | Baixa percepção de risco | Considerar no plano de desenvolvimento do empregado a execução de cursos de Gestão de Risco em Saúde e Segurança direcionado ao Estudo de Perigos e Operabilidade. | Capacitar para o reconhecimento e análise de desvios de processos visando a proposição de medidas e controles, e formas de eliminação ou redução de riscos, além de promover a percepção de riscos no ambiente de trabalho. |
| Quebra das Caçambas por Operação inadequada - Recuperação em translação. | Falta de Disciplina operacional | Realizar diálogos e reuniões periódicas com a equipe para criar senso de disciplina operacional. | Criar senso de disciplina operacional. |
| Quebra das Caçambas por falta de manutenção sistemática ou execução inadequada da Manutenção Planejada. | Falta de disciplina operacional | Criar planos de manutenção e sistematizar. Treinar todos os executantes nas rotinas de manutenção. | Qualificação técnica e comportamental da equipe |
| Quebra do Rolete de Carga por Sobrecarga (Falha Operacional) | Falta de atenção e disciplina operacional (Rotina) | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |
| Quebra do Rolete de Retorno devido falha na inspeção | Falta de atenção e habilidade técnica | Estabelecer padrão, revisar/criar novas rotas de inspeção (checklist) e treinar todos os executantes. | Assegurar cobertura da instalação e adequar a frequência de inspeção |
| Quebra do Rolete de Retorno devido limpeza inadequada | Falta ou falha na execução da rotina operacional | Definir padrões de qualidade em processos de limpeza industrial (imagens com referências de padrões desejados) e treinar os executantes para a atividade. | Desenvolver habilidades e sensos de limpeza e organização de área. |

Para os modos de falhas humanas de natureza mecânicas não modeladas quantitativamente, as principais causas estão relacionadas à falta de atenção, concentração e falha na execução da rotina operacional. O estabelecimento de rotinas operacionais, a priorização de qualificação do time em gestão para resultados e tomada de decisões, e o estabelecimento de padrões visuais para auxiliar na identificação correta de materiais se constituem como ações efetivas a serem executadas a curto e médio prazos. O ajuste anual das matrizes de treinamentos, priorizando cursos que proporcionem desenvolvimento e aprimoramento do comportamento humano, mostra-se como ação efetiva na construção de novas competências e eliminação do erro humano por falta de informações. Por fim, colaboradores que detêm experiência e maior expertise técnica podem definir os padrões visuais que deverão servir como modelo a ser seguido. Espera-se, com estas ações, a obtenção de colaboradores disciplinados e conscientes de suas responsabilidades.

## 4.2 Falhas Elétricas

Falhas elétricas que decorrem de causas humanas podem estar associadas a erros em ajustes de parâmetros, conexões, limpeza inadequada, montagens incorretas, vedação ineficiente, quebras de tubulações, falhas no cumprimento de planos preventivos de manutenção e falha no dimensionamento de fusíveis, dentre outras.

Foram escolhidos 15 especialistas para preenchimento da FMEA relativa a falhas elétricas decorrentes de razões humanas, conforme descrito na seção 3.2; semelhantemente ao que foi apontado na tratativa às falhas mecânicas, esse preenchimento não é completo, visto que o RPN somente é calculado depois da seleção dos especialistas mais consistentes.

Na sequência, gerou-se a matriz dos coeficientes *Rv*, conforme o Quadro 15; 9 especialistas foram selecionados por conta dos seus elevados níveis de concordância no preenchimento dos índices da FMEA. Os especialistas selecionados são destacados na mesma tabela.

Quadro 15 - Matriz *Rv* para Falhas Elétricas

| | | ESPECILISTAS | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Mediana | Classificação |
| ESPECIALISTAS | 1 | 1,000 | 0,690 | 0,843 | 0,805 | 0,893 | 0,761 | 0,892 | 0,860 | 0,864 | 0,729 | 0,723 | 0,836 | 0,838 | 0,823 | 0,782 | 0,836 | Selecionado |
| | 2 | 0,690 | 1,000 | 0,811 | 0,729 | 0,746 | 0,687 | 0,750 | 0,821 | 0,727 | 0,730 | 0,785 | 0,672 | 0,742 | 0,723 | 0,722 | 0,730 | Nãoselecionado |
| | 3 | 0,843 | 0,811 | 1,000 | 0,818 | 0,891 | 0,729 | 0,817 | 0,889 | 0,859 | 0,717 | 0,731 | 0,817 | 0,845 | 0,820 | 0,788 | 0,818 | Nãoselecionado |
| | 4 | 0,805 | 0,729 | 0,818 | 1,000 | 0,886 | 0,742 | 0,870 | 0,871 | 0,818 | 0,789 | 0,789 | 0,779 | 0,810 | 0,790 | 0,825 | 0,810 | Nãoselecionado |
| | 5 | 0,893 | 0,746 | 0,891 | 0,886 | 1,000 | 0,841 | 0,922 | 0,950 | 0,934 | 0,790 | 0,784 | 0,879 | 0,910 | 0,861 | 0,852 | 0,886 | Selecionado |
| | 6 | 0,761 | 0,687 | 0,729 | 0,742 | 0,841 | 1,000 | 0,818 | 0,810 | 0,784 | 0,765 | 0,753 | 0,703 | 0,763 | 0,746 | 0,691 | 0,761 | Nãoselecionado |
| | 7 | 0,892 | 0,750 | 0,817 | 0,870 | 0,922 | 0,818 | 1,000 | 0,927 | 0,935 | 0,785 | 0,793 | 0,859 | 0,903 | 0,867 | 0,859 | 0,867 | Selecionado |
| | 8 | 0,860 | 0,821 | 0,889 | 0,871 | 0,950 | 0,810 | 0,927 | 1,000 | 0,942 | 0,809 | 0,815 | 0,876 | 0,916 | 0,897 | 0,890 | 0,889 | Selecionado |
| | 9 | 0,864 | 0,727 | 0,859 | 0,818 | 0,934 | 0,784 | 0,935 | 0,942 | 1,000 | 0,761 | 0,723 | 0,883 | 0,902 | 0,885 | 0,858 | 0,864 | Selecionado |
| | 10 | 0,729 | 0,730 | 0,717 | 0,789 | 0,790 | 0,765 | 0,785 | 0,809 | 0,761 | 1,000 | 0,754 | 0,721 | 0,734 | 0,755 | 0,746 | 0,755 | Nãoselecionado |
| | 11 | 0,723 | 0,785 | 0,731 | 0,789 | 0,784 | 0,753 | 0,793 | 0,815 | 0,723 | 0,754 | 1,000 | 0,713 | 0,733 | 0,755 | 0,743 | 0,754 | Nãoselecionado |
| | 12 | 0,836 | 0,672 | 0,817 | 0,779 | 0,879 | 0,703 | 0,859 | 0,876 | 0,883 | 0,721 | 0,713 | 1,000 | 0,879 | 0,822 | 0,791 | 0,822 | Selecionado |
| | 13 | 0,838 | 0,742 | 0,845 | 0,810 | 0,910 | 0,763 | 0,903 | 0,916 | 0,902 | 0,734 | 0,733 | 0,879 | 1,000 | 0,807 | 0,834 | 0,838 | Selecionado |
| | 14 | 0,823 | 0,723 | 0,820 | 0,790 | 0,861 | 0,746 | 0,867 | 0,897 | 0,885 | 0,755 | 0,755 | 0,822 | 0,807 | 1,000 | 0,823 | 0,822 | Selecionado |
| | 15 | 0,782 | 0,722 | 0,788 | 0,825 | 0,852 | 0,691 | 0,859 | 0,890 | 0,858 | 0,746 | 0,743 | 0,791 | 0,834 | 0,823 | 1,000 | 0,823 | Selecionado |
| | | | | | | | | | | | | | | Média das Medianas | | | 0,818 | |

O apêndice E traz a FMEA com os RPNs valendo-se somente dos índices dos especialistas selecionados para falhas humanas elétricas; conforme proposto no método, somente são analisados os modos de falha como RPN>100. Destes, dois modos de falhas (E1 e E2) possuem número de registros de tempos até a falha superiores a 20, possibilitando a modelagem quantitativa e elaboração do plano de melhoria preconizado pela FMEA. Os demais modos de falhas (E4 ao E9) recebem um plano de melhoria sem modelagem de tempos até a falhas (visto que se deseja uma amostra superior a 20 observações para assegurar consistência no processo de modelagem). A modelagem quantitativa dos tempos até a falha dos modos E1 e E2, bem como os planos de melhoria gerados para cada modo de falha preponderante (RPN>100), é apresentada nas seções que seguem. Os procedimentos estatísticos foram realizados através do aplicativo Proconf.

### 4.2.1 Modo de Falha 1 (E1) - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente)

Trinta e sete tempos até a falha foram modelados, utilizando o papel de Probabilidade e os testes analíticos Qui-quadrado e Kolmogorov (K-S) para avaliar a aderência das distribuições Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal aos tempos. Na Figura 17 são apresentados os testes analíticos.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 74,4618 | 12 | 14, | 0,28 |
| 74,4618 | 148,9236 | 7 | 8,4 | 0,23 |
| 148,9236 | 223,3854 | 8 | 5, | 1,73 |
| 223,3854 | 297,8472 | 2 | 3, | 0,35 |
| 297,8472 | 372,309 | 4 | 1,8 | 2,61 |
| 372,309 | above | 2 | 2,7 | 0,20 |

$\chi^2$= 5,40 com 4 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,2484

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1064  Nível de Significância = 0,2187

A hipótese de que a população segue o modelo Exponencial não pode ser rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 74,4618 | 12 | 16,3 | 1,11 |
| 74,4618 | 148,9236 | 7 | 7, | 0,00 |
| 148,9236 | 223,3854 | 8 | 4, | 3,93 |
| 223,3854 | 297,8472 | 2 | 2,5 | 0,10 |
| 297,8472 | 372,309 | 4 | 1,6 | 3,45 |
| 372,309 | above | 2 | 3,6 | 0,73 |

$\chi^2$= 9,33 com 3 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0252

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1308  Nível de Significância = 0,1308

A hipótese de que a população segue o modelo Weibull é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 74,4618 | 12 | 18,9 | 2,50 |
| 74,4618 | 148,9236 | 7 | 4,3 | 1,65 |
| 148,9236 | 223,3854 | 8 | 2,3 | 14,11 |
| 223,3854 | 297,8472 | 2 | 1,5 | 0,18 |
| 297,8472 | 372,309 | 4 | 1,1 | 8,21 |
| 372,309 | above | 2 | 7, | 3,54 |

$\chi^2$= 30,17 com 3 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0001

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,2059  Nível de Significância = 0,0006

A hipótese de que a população segue o modelo Lognormal é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 74,4618 | 12 | 6,5 | 4,77 |
| 74,4618 | 148,9236 | 7 | 8,9 | 0,40 |
| 148,9236 | 223,3854 | 8 | 8,8 | 0,07 |
| 223,3854 | 297,8472 | 2 | 6,2 | 2,86 |
| 297,8472 | 372,309 | 4 | 3,2 | 0,22 |
| 372,309 | above | 2 | 1,5 | 0,15 |

$\chi^2$= 8,47 com 3 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0373

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,2239  Nível de Significância = 0,0001

A hipótese de que a população segue o modelo Normal é rejeitada.

Figura 17 – Testes de Aderência para Falha Elétrica - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente)

Os testes permitem afirmar que os tempos até a falha para o modo “Defeito no Circuito de Comando” seguem o modelo Exponencial. A Figura 18 traz os papéis de probabilidade para as distribuições Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal. A análise visual do papel de probabilidade mostra que o modelo Exponencial é mais adequado para o modo de falha E1, sendo então utilizado nas análises seguintes associadas à Defeito no Circuito de Comando devido a aperto inadequado das conexões ou ineficiência da vedação da caixa de ligação.

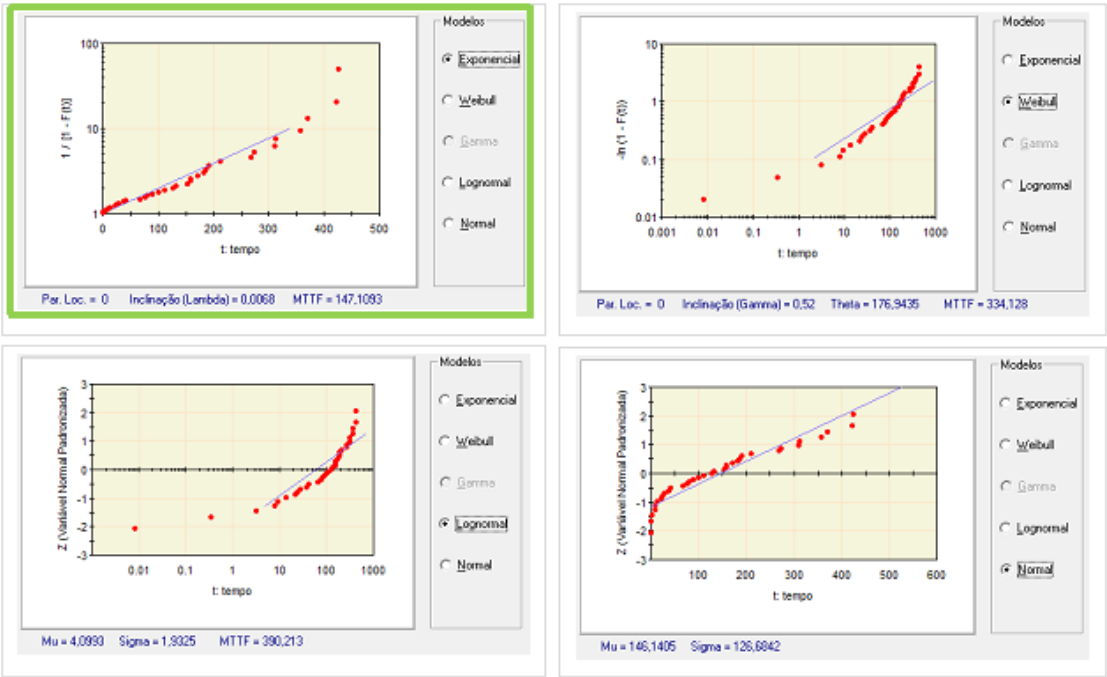



Figura 18 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Elétrica – Defeito no circuito de comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente)

A Figura 19 mostra a função confiabilidade (*R(t)*) gerada pela distribuição Exponencial. Verifica-se que o perfil de confiabilidade apresenta acentuada tendência de decréscimo nas primeiras 200 horas; a partir de então, a diminuição da confiabilidade do circuito de comando não é muito acentuada.

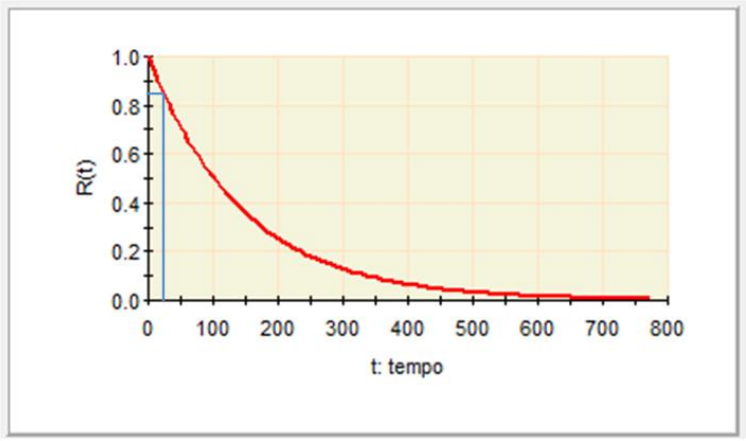
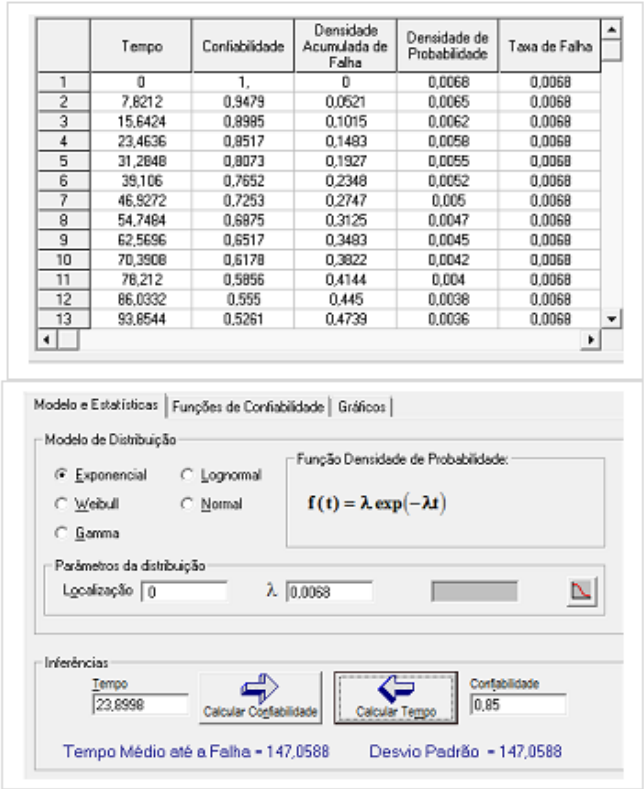



Figura 19 – Função de Confiabilidade (R(*t*)) para Falha Elétrica - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente)

Conforme mostra a Figura 20, considerando uma confiabilidade mínima de 85%, o intervalo de verificação recomendado é de 24h para tratativa de falhas humanas. Tais

verificações podem incluir ações para garantia da qualidade na execução das rotinas de manutenção elétrica. Procedimentos de intervenção bem elaborados, treinamentos eficientes, persistências na execução e rotinas de diagnósticos técnicos podem contribuir, significativamente, para identificação do nível de atenção concentrada indispensável para a execução desta atividade. Neste sentido, o Quadro 16 apresenta o plano de melhoria sugerido para o modo de falha relacionado a Defeito no Circuito de Comando causado por aperto inadequado das conexões ou pela ineficiência da vedação da caixa de ligação.



| | Tempo | Confiabilidade | Densidade Acumulada de Falha | Densidade de Probabilidade | Taxa de Falha |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1, | 0 | 0,0068 | 0,0068 |
| 2 | 7,8212 | 0,9479 | 0,0521 | 0,0065 | 0,0068 |
| 3 | 15,6424 | 0,8985 | 0,1015 | 0,0062 | 0,0068 |
| 4 | 23,4636 | 0,8517 | 0,1483 | 0,0058 | 0,0068 |
| 5 | 31,2848 | 0,8073 | 0,1927 | 0,0055 | 0,0068 |
| 6 | 39,106 | 0,7652 | 0,2348 | 0,0052 | 0,0068 |
| 7 | 46,9272 | 0,7253 | 0,2747 | 0,005 | 0,0068 |
| 8 | 54,7484 | 0,6875 | 0,3125 | 0,0047 | 0,0068 |
| 9 | 62,5696 | 0,6517 | 0,3483 | 0,0045 | 0,0068 |
| 10 | 70,3908 | 0,6178 | 0,3822 | 0,0042 | 0,0068 |
| 11 | 78,212 | 0,5856 | 0,4144 | 0,004 | 0,0068 |
| 12 | 86,0332 | 0,555 | 0,445 | 0,0038 | 0,0068 |
| 13 | 93,8544 | 0,5261 | 0,4739 | 0,0036 | 0,0068 |



Figura 20 – Determinação da Confiabilidade para 85% - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente)

Uso inadequado de ferramentas, avarias ou até mesmo a falta das mesmas constituem-se em causas associadas a fatores humanos que acarretam aperto inadequado das conexões e subsequentes defeitos no circuito de comando. Estas causas, adicionadas à eventual falta de disciplina e senso de responsabilidade, constituem-se outros fatores que contribuem para a ocorrência de falhas no modo em questão. A criação de procedimentos e padrões para utilização de ferramentas de maneira adequada, bem como o treinamento dos executantes, são ações que podem ser implantadas em curto prazo e assegurar qualidade na execução das atividades. Tais medidas podem ser implementadas por técnicos especializados de

manutenção e lideranças de primeiro nível, considerando que estes cargos apresentam estas competências desenvolvidas. A estruturação do plano de melhorias foi feita com a participação de especialistas da área com formação em elétrica (supervisores, técnicos especializados e inspetores), analistas e psicólogas do RH.

Quadro 16 - Plano de Melhoria para Falhas Elétricas - Defeito no Circuito de Comando (aperto inadequado das conexões ou vedação da caixa de ligação ineficiente)

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS ELÉTRICAS (MODELADAS) | | |
|---|---|---|
| **O QUE CAUSA** | **AÇÃO** | **OBJETIVO** |
| Uso de ferrramentas inadequadas por negligencia ou falta de conhecimento. | Definir padrões de utilização de ferramentas conforme demandas e treinar executantes nos padrões. | Ter mapeamento e definição das ferramentas certas para cada atividade e instruir colaboradores quanto a utilização da mesma |
| Falta de ferramentas apropriadas ou avaria da mesma. | Definir ferramental necessário para execução de atividades e estabelecer rotinas de inspeção e controle das mesmas (controle na ferramentaria). | Instruir os colaboradores quanto ao uso correto de cada ferramenta. Substituir ferramental avariado em tempo hábil. |
| Motivação incorreta (avaliação de necessidades deficiente, julgamento incorreto) - colaborador decide não executar a atividade por julgar que não é | Realizar diálogos e reuniões periódicas com a equipe para criar senso de disciplina operacional. | Criar senso de disciplina operacional. |
| | Estimular a comunicação compartilhando conhecimentos técnicos e estabelecer planos para desenvolvimento de carreiras concedendo feedbacks estruturados regularmente. | Identificar perfis e adequá-los melhor as atividades/funções. Reduzir/eliminar acomodação à rotina (zona de conforto) gerando desenvolvimento de novas competências e habilidades técnicas. |
| Falta de habilidade. | Criar plano de desenvolvimento de habilidades técnicas para os novos colaboradores - programa padrinho com definição de plano de desenvolvimento de habilidades técnicas com avaliações sistemáticas. | Desenvolver habilidades técnicas em menor tempo. |
| | Realizar rotatividade em atividades para estimular o desenvolvimento profissional e crescimento da equipe (se possível montar cronograma com escalas, funções e responsabilidades - estar atento as responsabilidades de cada cargo) | |
| Esquecimento, desatenção. | Criar rotinas de execução de tarefas incluindo *checklist* no final das atividades para evitar esquecimentos. Sugere-se a criação de lista de verificação no cartão de tempo ou no Project (verso as folha) tornando como obrigatório o seu preenchimento antes da liberação do equipamento. | Educar executante na aplicação de ferramentas de qualidade (5"S", por exemplo) para evitar que falhas elementares associadas aos sensos de organização, utilização e limpeza sejam negligenciados em frentes de serviço. |
| Pressa na execução da atividade | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado o treinamento em gestão do tempo com ênfase no aprimoramento do autocontrole para administrar situações de tensão. | Capacitar o colaborador na administração da rotina de trabalho, por meio da aplicação dos procedimentos operacionais e apresentar técnicas que permitam uma melhor utilização do tempo. |
| Falha de comunicação | Criar relatório de execução preventiva para orientar ações subsequentes (complementação ou correção) | Facilitar a comunicação. |

### 4.2.2 Modo de Falha 2 (E2) - Curto Circuito em Motoredutores, Contatores, Circuito de força, Freio e Chave de Emergência devido a aperto inadequado das conexões ou falha no cumprimento da manutenção preventiva

Foram modelados 32 tempos até a falha para o modo de falha E2 – Curto Circuito em Motoredutores, Contatores, Circuito de força, Freio e Chave de Emergência devido a aperto inadequado das conexões ou falha no cumprimento da manutenção preventiva. A aderência

das distribuições Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal é avaliada com o uso dos testes analíticos Qui-quadrado e Kolmogorov (K-S). A Figura 21 mostra os testes para as distribuições do modo de falha E2; verifica-se que este modo de falha segue o modelo Weibull (os demais modelos devem ser rejeitados).

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 68,964 | 15 | 16,4 | 0,11 |
| 68,964 | 137,9279 | 7 | 6,1 | 0,14 |
| 137,9279 | 206,8919 | 3 | 2,3 | 0,25 |
| 206,8919 | 275,8559 | 0 | 0,8 | 0,84 |
| 275,8559 | 344,8198 | 0 | 0,3 | 0,31 |
| 344,8198 | above | 1 | 0,2 | 3,65 |

$\chi^2$ = 5,30 com 4 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,258

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,2252  Nível de Significância = 0,0015

A hipótese de que a população segue o modelo Exponencial é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 68,964 | 15 | 18, | 0,50 |
| 68,964 | 137,9279 | 7 | 3,9 | 2,46 |
| 137,9279 | 206,8919 | 3 | 1,7 | 0,90 |
| 206,8919 | 275,8559 | 0 | 0,9 | 0,91 |
| 275,8559 | 344,8198 | 0 | 0,5 | 0,52 |
| 344,8198 | above | 1 | 0,9 | 0,01 |

$\chi^2$ = 5,31 com 3 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,1506

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1649  Nível de Significância = 0,067

A hipótese de que a população segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 68,964 | 15 | 18,7 | 0,74 |
| 68,964 | 137,9279 | 7 | 2,8 | 6,09 |
| 137,9279 | 206,8919 | 3 | 1,3 | 2,33 |
| 206,8919 | 275,8559 | 0 | 0,7 | 0,73 |
| 275,8559 | 344,8198 | 0 | 0,5 | 0,47 |
| 344,8198 | above | 1 | 1,9 | 0,46 |

$\chi^2$ = 10,83 com 3 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0127

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,1994  Nível de Significância = 0,0092

A hipótese de que a população segue o modelo Lognormal é rejeitada.

Teste Analítico do $\chi^2$:

| Limite Inferior | Limite Superior | Freqüência Observada | Freqüência Esperada | Valor do qui-quadrado |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 68,964 | 15 | 9,4 | 3,33 |
| 68,964 | 137,9279 | 7 | 9,5 | 0,64 |
| 137,9279 | 206,8919 | 3 | 5,2 | 0,96 |
| 206,8919 | 275,8559 | 0 | 1,6 | 1,60 |
| 275,8559 | 344,8198 | 0 | 0,3 | 0,27 |
| 344,8198 | above | 1 | 0, | 35,89 |

$\chi^2$ = 42,70 com 3 graus de liberdade  Nível de Significância = 0,0001

Teste Analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S):
DN = 0,3574  Nível de Significância = 0,0001

A hipótese de que a população segue o modelo Normal é rejeitada.

Figura 21 – Testes de Aderência para Falha Elétrica - Curto-Circuito (aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva)

Na sequência, avalia-se a proximidade dos tempos modelados em relação à reta sugerida para as distribuições em estudo por intermédio do papel de probabilidade. Na Figura 22 é possível observar os gráficos dos modelos Exponencial, Weibull, Lognormal e Normal; a análise visual do papel de probabilidade mostra que a distribuição Weibull é adequada para modelagem, sendo então utilizada nas análises subsequentes.

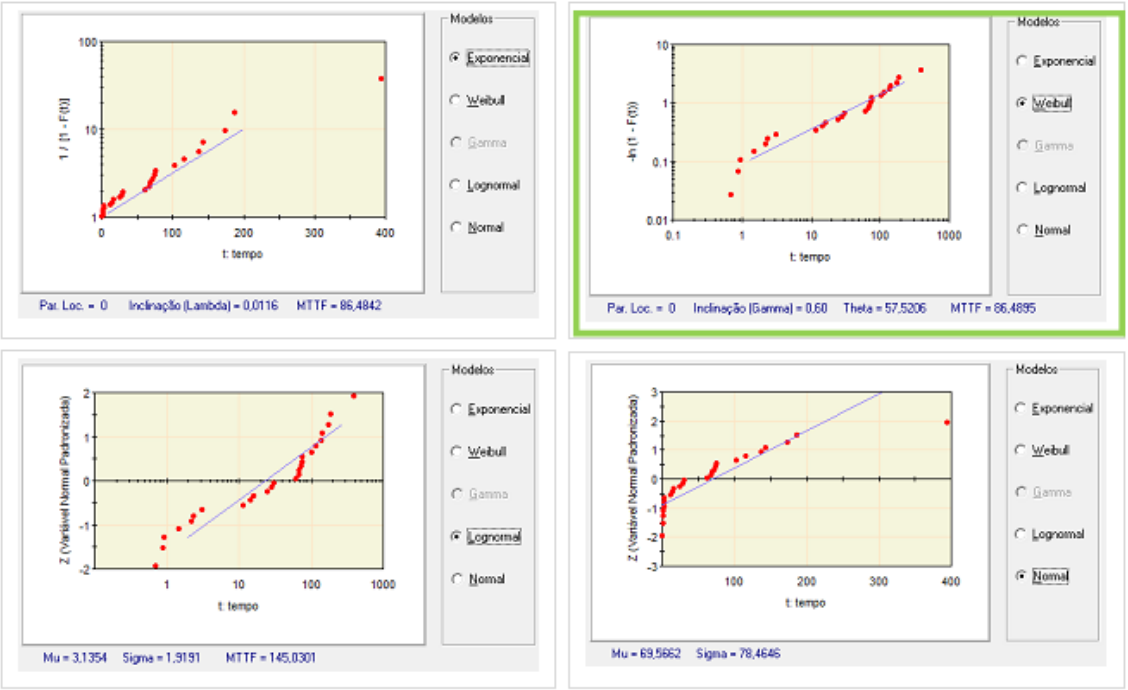



Figura 22 - Testes de Papel de Probabilidade para Falha Elétrica - Curto-Circuito (aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva)

Considerado o modelo de distribuição Weibull como o mais adequado, gera-se o gráfico de confiabilidade na Figura 23. O perfil de confiabilidade apresenta acentuada característica de tendência de decréscimo nas primeiras 145 horas, a partir de então a curva começa a suavizar e a diminuição da confiabilidade do equipamento já se mostra leve.

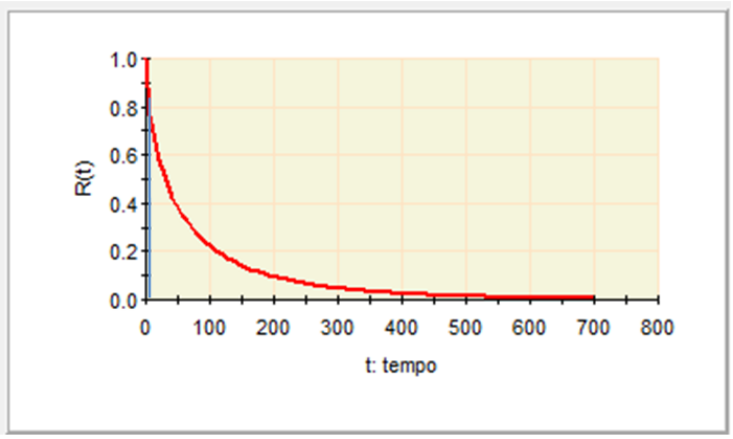
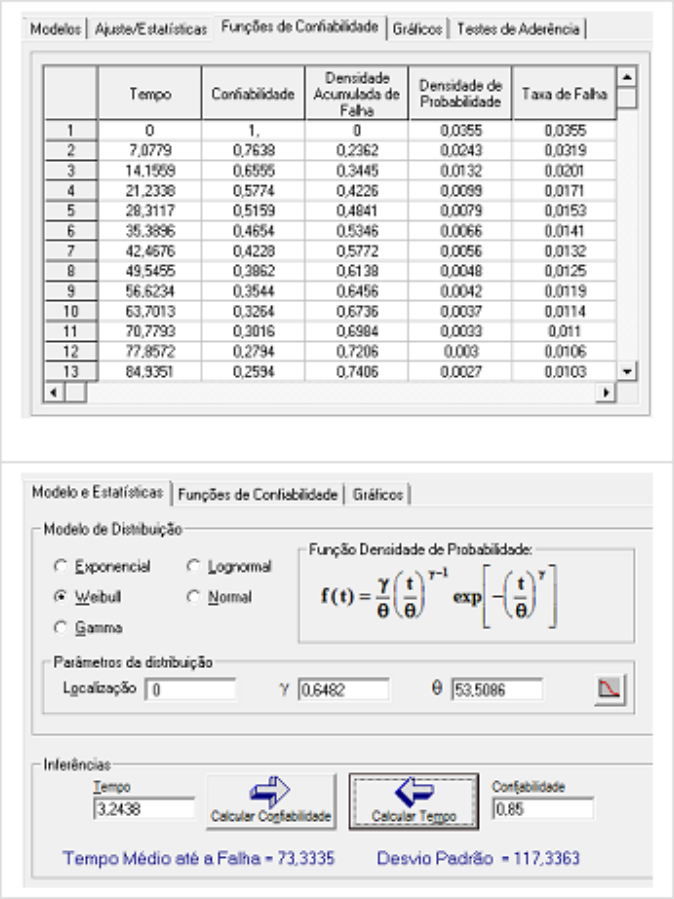



Figura 23 –Função de Confiabilidade (R(*t*)) para Falha Elétrica - Curto-Circuito (aperto das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva)

Considerando uma confiabilidade de 85%, o intervalo de verificação para a tratativa de falhas humanas corresponde a 4 horas, conforme apresentado na Figura 24. É possível verificar um curto tempo para ocorrência de falhas humanas que comprometam o funcionamento do sistema, o que demanda ações de checagem e reavaliação bastante frequentes. Criar um *checklist* no final das atividades (inserindo o mesmo no cartão de tempo ou no *project*, tornando obrigatório o seu preenchimento antes da liberação do equipamento) se constitui em uma medida eficiente para evitar esquecimentos e inibir a falha.




| | Tempo | Confiabilidade | Densidade Acumulada de Falha | Densidade de Probabilidade | Taxa de Falha |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1, | 0 | 0,0355 | 0,0355 |
| 2 | 7,0779 | 0,7638 | 0,2362 | 0,0243 | 0,0319 |
| 3 | 14,1559 | 0,6555 | 0,3445 | 0,0132 | 0,0201 |
| 4 | 21,2338 | 0,5774 | 0,4226 | 0,0099 | 0,0171 |
| 5 | 28,3117 | 0,5159 | 0,4841 | 0,0079 | 0,0153 |
| 6 | 35,3896 | 0,4654 | 0,5346 | 0,0066 | 0,0141 |
| 7 | 42,4676 | 0,4228 | 0,5772 | 0,0056 | 0,0132 |
| 8 | 49,5455 | 0,3862 | 0,6138 | 0,0048 | 0,0125 |
| 9 | 56,6234 | 0,3544 | 0,6456 | 0,0042 | 0,0119 |
| 10 | 63,7013 | 0,3264 | 0,6736 | 0,0037 | 0,0114 |
| 11 | 70,7793 | 0,3016 | 0,6984 | 0,0033 | 0,011 |
| 12 | 77,8572 | 0,2794 | 0,7206 | 0,003 | 0,0106 |
| 13 | 84,9351 | 0,2594 | 0,7406 | 0,0027 | 0,0103 |

Figura 24 – Determinação da Confiabilidade para 85% - Curto-Circuito (aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva)

O MTTF para o modo de falha E2 “Curto-Circuito” corresponde a 74 horas (valor inferior ao modo de falha E1 - “Defeito no Circuito de Comando”, anteriormente analisado), o que sugere ações de melhorias fortemente ligadas à rotina operacional cotidiana a fim de assegurar a atenção para cumprimento de procedimentos operacionais rotineiros. Especificamente, observa-se a falha na execução de manutenção preventiva, o que aponta para a necessidade de maior controle de tempo e qualidade na execução da atividade. Estes fatores podem ser fortemente impactados pela falha no gerenciamento da rotina de trabalho. O

Quadro 17 traz o plano de melhoria para Curto-Circuito causado por aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva. Psicólogas, analistas do setor de RH, engenheiros, supervisores de manutenção elétrica contribuíram para a estruturação deste plano.

Quadro 17: Plano de Melhoria para Falhas Elétricas - Curto-Circuito causado por aperto inadequado das conexões e falha no cumprimento da manutenção preventiva

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS ELÉTRICAS (MODELADAS) | | |
|---|---|---|
| **O QUE CAUSA** | **AÇÃO** | **OBJETIVO** |
| Uso de ferrramentas inadequadas por negligencia ou falta de conhecimento. | Definir padrões de utilização de ferramentas conforme demandas e treinar executantes nos padrões. | Ter mapeamento e definição das ferramentas certas para cada atividade e instruir colaboradores quanto a utilização da mesma. |
| Falta de ferramentas apropriadas ou avaria da mesma. | Definir ferramental necessário para execução de atividades e estabelecer rotinas de inspeção e controle das mesmas (controle na ferramentaria). | Instruir os colaboradores quanto ao uso correto de cada ferramenta. Substituir ferramental avariado em tempo hábil. |
| Motivação incorreta (avaliação de necessidades deficiente, julgamento incorreto) - colaborador decide não executar a atividade por julgar que não é | Realizar diálogos e reuniões periódicas com a equipe para criar senso de disciplina operacional. | Criar senso de disciplina operacional. |
| | Estimular a comunicação compartilhando conhecimentos técnicos e estabelecer planos para desenvolvimento de carreiras concedendo feedbacks estruturados regularmente. | Identificar perfis e adequá-los melhor as atividades/funções. Reduzir/eliminar acomodação à rotina (zona de conforto) gerando desenvolvimento de novas competências e habilidades técnicas. |
| Falta de habilidade. | Criar plano de desenvolvimento de habilidades técnicas para os novos colaboradores - programa padrinho com definição de plano de desenvolvimento de habilidades técnicas com avaliações sistemáticas. | Desenvolver habilidades técnicas em menor tempo. |
| | Realizar rotatividade em atividades para estimular o desenvolvimento profissional e crescimento da equipe (se possível montar cronograma com escalas, funções e responsabilidades - estar atento as responsabilidades de cada cargo) | |
| Esquecimento de ferramentas/materiais no local de trabalho - falha na execução de MP | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |
| Falta de competência técnica | Mapear atividades sem procedimentos definidos e criar novos procedimentos. | Treinar/qualificar colaboradores |
| | Mapear atividades e correlacionar com os procedimentos operacionais existentes. | |
| Pressa na execução da atividade | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado o treinamento em gestão do tempo com ênfase no aprimoramento do autocontrole para administrar situações de tensão. | Capacitar o colaborador na administração da rotina de trabalho, por meio da aplicação dos procedimentos operacionais e apresentar técnicas que permitam uma melhor utilização do tempo. |
| Falha de comunicação | Criar relatório de execução preventiva para orientar ações subsequentes (complementação ou correção) | Facilitar a comunicação. |

A criação de senso de responsabilidade e disciplina são objetivos principais na tratativa deste modo de falha elétrica. Atividade rotineira, normalmente, aponta para perfis profissionais que devem trazer alto grau de controle, gestão e disciplina. Logo, é

indispensável a identificação de perfis que melhor se adequem à manutenção planejada, bem como o desenvolvimento de competências e habilidades técnicas através do departamento de ensino e RH. Para facilitar a comunicação entre executantes em atividades sequenciais, é salutar a criação de relatórios de execução preventiva para assegurar a continuidade da ordem de manutenção.

Dos 21 modos de falhas elétricas inicialmente identificados, 2 apresentaram dados de tempos até a falhas que possibilitaram modelagem quantitativa, enquanto que outros 7 apresentaram RPN>100 com número insuficiente de dados para modelagem. Todavia, entende-se que estes modos carecem de tratativas e, para tanto, é apresentado um plano de melhoria no Quadro 18 cuja estruturação contou com a participação de especialistas da área (técnicos, inspetores, engenheiros, psicólogos e analistas de RH).

Quadro 18: Plano de Melhoria para Falhas Elétricas não modeladas com RPN>100

| PLANO DE MELHORIAS - FALHAS ELÉTRICAS (NÃO MODELADAS) | | | |
|---|---|---|---|
| **MODO DE FALHA NÃO MODELADO** | **O QUE CAUSA** | **AÇÃO** | **OBJETIVO** |
| Corrente Alta no Moto-Redutor de Locomoção devido ineficiência na limpeza dos trilhos. | Falha na execução da rotina operacional | Definir padrões de qualidade em processos de limpeza industrial (imagens com referências de padrões desejados) e treinar os executantes para a atividade. | Desenvolver habilidades e sensos de limpeza e organização de área. |
| Curto-circuito no Contator devido falha no cumprimento da Manutenção Planejada | Desatenção, falta de disciplina operacional | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |
| Defeito no Circuito de Comando do Disjuntor devido inversão nas conexões do switch | Falta de atenção, falta de conhecimento. | Incluir no Plano de Desenvolvimento do Empregado o treinamento em Gestão para Resultados e Tomada de Decisão | Analisar os impactos de decisões e ações, por meio da utilização de visão sistêmica e do conhecimento do negócio, para mitigar riscos e maximizar oportunidades de melhoria e fornecer padrões sistemáticos e técnicos para o desenvolvimento da capacidade de tomar decisões. |
| Defeito no Circuito de Comando do Disjuntor devido limpeza inadequada. | Falha na execução da rotina de manutenção. | Definir padrões de qualidade em processos de limpeza industrial (imagens com referências de padrões desejados) e treinar os executantes para a atividade. | Desenvolver habilidades e sensos de limpeza e organização de área. |
| Desarme do Contator por sobrecarga | Falta de atenção da equipe ou falha no cumprimento da rotina operacional. | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |
| Mau Contato no Freio devido aperto inadequado nas conexões | Uso de ferrramentas inadequadas por negligencia ou falta de conhecimento. | Definir padrões de utilização de ferramentas conforme demandas e treinar executantes nos padrões. | Ter mapeamento e definição das ferramentas certas para cada atividade e instruir colaboradores quanto a utilização da mesma |
| Sobrecarga no Circuito de Força por falha operacional | Falta de atenção da equipe ou falha no cumprimento da rotina operacional. | Estabelecer e padronizar rotina operacional nos turnos relacionando itens prioritários (checklist) para verificação obrigatória durante a jornada de trabalho. | Evitar esquecimentos, desatenção ou baixa concentração mantendo o estado de alerta ativo. |

Os modos de falhas humanas acima listadas apresentam, em sua maioria, causas relacionadas às equipes de manutenção e de operação. Tipicamente constata-se, em ambas as equipes, a falta de atenção ou falhas no cumprimento da rotina operacional. O

estabelecimento de rotinas mais rígidas e a padronização destas rotinas mostram-se como ações necessárias. Para tanto, pode-se fazer uso de *checklists* de inspeção a serem estruturados conforme o tipo de atividade a ser executada (manutenção ou operação). Estes, quando bem estruturados, direcionam os colaboradores na execução de atividades da maneira correta e minimizam erros humanos por desatenção ou baixa concentração.

A Figura 25 apresenta, em síntese, os tempos obtidos pela modelagem para as falhas humanas modeladas de natureza mecânica e elétrica, considerando o tempo médio (MTTF) até a ocorrência da falha e o tempo necessário para execução de uma ação para uma confiabilidade de 85%. Percebe-se a necessidade de execução de ações em curto prazo (diárias, semanais ou mensais) para manter o estado de alerta ativo evitando esquecimentos e desconcentração. Ações para prazos maiores (bimestrais ou anuais) também são aplicáveis, principalmente as relacionadas à construção de competências técnicas e desenvolvimento de habilidades.

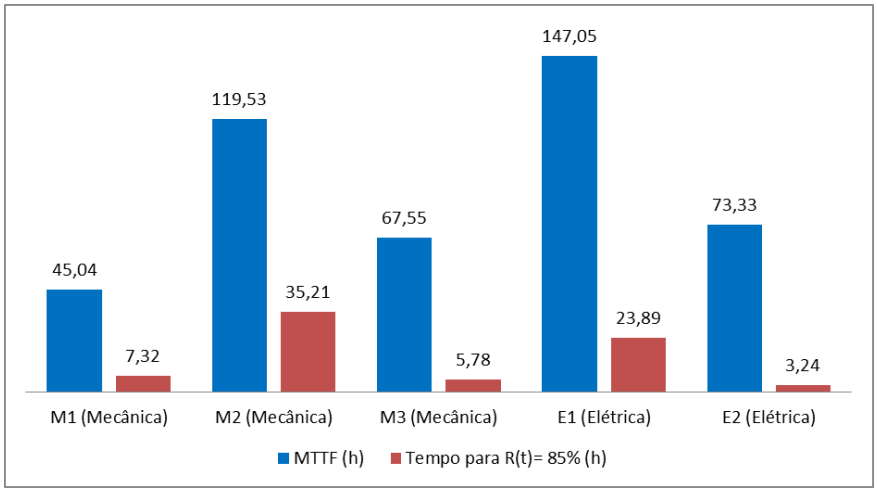



Figura 25 - Tempos necessários para aplicação de ação para tratativa de desvios comportamentais (falhas humanas)

A Figura 26 apresenta, em síntese, as principais ações dos planos de melhorias para os modos de falhas modelados e não modelados. É possível observar que a falta de conhecimento e competência técnica representa o maior percentual de ações, o que remete a oferta de treinamentos e cursos de qualificação profissional com foco no tratamento de comportamentos inadequados para minimização de erros humanos. A falta de atenção, indisciplina operacional, falha na execução da rotina operacional, esquecimento e negligencia também, destacam-se como ações importantes quanto a sua implementação visto que juntas representam mais de 50% das ações propostas.

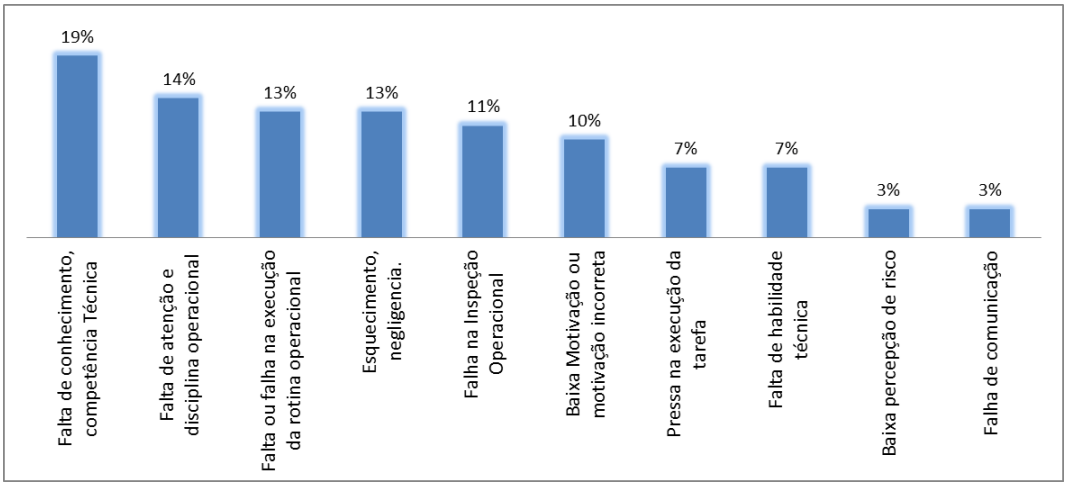



Figura 26 - Categorias das ações dos planos de melhorias para modos de falhas modelados e não modelados

Para tratativa da falta de conhecimento e competência técnica, algumas ações tem sido implementaas. O Quadros 19 apresenta os resultados das ações de certificação básica e técnica aplicadas a colaboradores com qualificação profissional de nível básico (mecânicos, eletricistas, soldadores) e o Quadro 20 mostra os resultados com qualificação técnica (técnico em mecânica, elétrica, eletrotécnica, eletromecânica). Estas ações permitem o mapeamento da falta de conhecimento em disciplinas essenciais para o desempenho das funções, seguido da oferta de treinamentos para construção de competências e aplicação de exames para avaliação da eficácia dos treinamentos ofertados.

Quadro 19 - Número de empregados submetidos à certificação básica

| Certificação Básica | | |
|---|---|---|
| **Status** | | **Nº de Empregados** |
| **Diagnosticados** | A capacitar | 1.367 |
| | Certificados | 2.144 |
| | Em Capacitação | 2.197 |
| **Não Diagnosticados** | Não diagnosticado | 430 |
| **Total** | | **6.138** |

Pode-se observar que 6.138 colaboradores de nível básico foram diagnosticados, 2144 foram certificados, 1367 necessitam de qualificação em disciplinas básicas e 2197 encontra-se em processo de capacitação básica nas disciplinas de matemática, português, meio ambiente, saúde e segurança.

Quadro 20 - Número de empregados submetidos à certificação técnica

| Certificação Técnica | | |
|---|---|---|
| Status | | Nº de Empregados |
| Diagnosticados | A capacitar | 394 |
| | Certificado na Teória | 38 |
| | Certificação Concluida | 6 |
| Não Diagnosticados | Função Não Identificada | 303 |
| | Diagnóstico Indisponível | 1215 |
| | Não Diagnosticado | 194 |
| Total | | 2144 |

É possível observar no Quadro 20 que 438 colaboradores de nível técnico já foram diagnosticados. Destes, 394 apresentam lacunas de conhecimentos essenciais para o pleno desempenho de suas funções, 38 foram certificados na teoria e seis concluíram suas certificações (teoria e prática). Estas certificações consideram disciplinas técnicas como: metrologia, elementos de máquinas (acoplamentos, redutores, rolamentos), lubrificação industrial, manutenção pneumática, dentre outras.

Considerando que este processo está em andamento, embora já se perceba um melhor desempenho dos colaboradores certificados na execução de suas funções, ainda é cedo para avaliação estatística e seus impactos na confiabilidade e disponibilidade de ativos.

Haja vista o período analisado para o ativo em estudo observa-se que as falhas ocorridas ocasionaram uma perda produtiva de mais de 13 milhões de toneladas de minério de ferro o que representa uma perda de lucratividade (preço de venda menos custos totais) de, aproximadamente, 290 milhões de dólares no cenário atual. Pode-se afirmar que para uma redução de 70% do total de perdas geradas pelas falhas humanas tratadas neste estudo (estimativa conservadora) geraria um ganho superior a 200 milhões de dólares.

A Tabela 3 apresenta o ganho financeiro (vendas menos o custo total) considerando a redução total das perdas ocasionadas por falhas humanas para o estudo de caso para a ER 151K-01.

Tabela 3 – Lucratividade com redução das perdas ocasionadas por falhas humanas

| Falhas Humanas | Lucro com redução das perdas (US$) | % Acumulado |
|---|---|---|
| Mecânica | 141.522.212,00 | 49% |
| Elétrica | 55.207.469,78 | 68% |
| Instrumentação | 42.105.312,89 | 82% |
| Engenharia | 34.267.768,89 | 94% |
| Automação | 12.148.713,78 | 99% |
| Preventiva | 4.331.354,44 | 100% |
| Total | 289.582.831,78 | |

# 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A necessidade em aperfeiçoar sistemas de produção está presente em todos os segmentos dos setores industriais. Desenvolvimento tecnológico e humano se constituem como fundamentais para elevar o nível de segurança e a confiabilidade das operações. Neste contexto, justificam-se estudos para identificação e minimização dos erros humanos que interferem no desempenho operacional de equipamentos da indústria mineral. Objetiva-se, através de tais abordagens, adequar comportamentos humanos e endereçar limitações e fatores que influenciam no desempenho dos processos e das pessoas.

Esta tese apresentou uma abordagem para avaliação da confiabilidade humana em mina a céu aberto, apoiando-se inicialmente em uma sistemática para seleção dos especialistas mais consistentes no preenchimento da FMEA e subsequente proposição de melhorias para adequação de comportamentos humanos.

Inicialmente, foram identificados especialistas de processo capazes de apontar modos de falhas humanas que comprometem a capacidade de produção ou operação do processo. Os respondentes preencheram, de forma isolada, os índices da planilha FMEA, incluindo o novo índice de severidade proposto (Severidade Humana), para cada modo de falha. Com a utilização do coeficiente de correlação $Rv$, o qual mede a correlação entre pares de matrizes de dados, foi possível selecionar os especialistas mais consistentes e manter somente suas opiniões na planilha FMEA. Na sequência, os modos de falha preponderantes (RPN>100) foram analisados em duas frentes. Na primeira frente, modos com mais de 20 registros tiveram seus tempos até a falha modelados quantitativamente através de distribuições estatísticas, objetivando-se definir intervalos de tempo entre inspeções e checagem do modo de execução dos operadores. Na segunda frente, gerou-se um plano de melhorias abordando todos os modos de falha com RPN>100. Tal plano contou com o detalhamento de ações de aprimoramento, definição de prazos e apontamento de responsáveis por sua execução.

A sistemática proposta foi aplicada em um equipamento chave para recuperação de minério da Mina de Carajás. Verificou-se que a tratativa do erro humano para obtenção de uma confiabilidade de 85% requer ações do cotidiano, visto que os períodos recomendados para verificação e checagem dos procedimentos operacionais estão compreendidos entre 4 e 36 horas. Neste sentido, foram propostas dinâmicas relacionadas a listas de verificação para tratar esquecimentos, diálogos comportamentais, ações que combatam pressão, estresse e fadiga, os quais podem potencializar erros humanos em atividades que demandam

concentração. A realização de exercícios de ativação mental, no início da jornada de trabalho, também se mostra como eficaz na percepção de comportamentos inadequados em atividade que exigem elevados níveis de atenção. Ações que demandam a construção de competências técnicas e desenvolvimento de habilidades tipicamente necessitam de maior período de tempo para implantação. Estas ações podem ser relacionadas com o mapa de desenvolvimento, de modo que o plano de aprimoramento do empregado contemple as necessidades de aperfeiçoamento comportamental.

É recomendável a criação de metodologia específica gerencial de recursos humanos para avaliar a qualidade dos treinamentos em todos os níveis quanto à eficiência e eficácia, e os níveis de motivação dos colaboradores.

O retorno financeiro (lucratividade) estimado, conservadoramente, com a implementação das ações representa valores superiores a 200 milhões de dólares apenas para o ativo analisado. A replicação das ações para os demais ativos semelhantes existentes no parque industrial da área estudada aponta para um lucro em torno de 1 bilhão de dólares com a redução das perdas produtivas ocasionadas por erros humanos.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a aplicação da sistemática em outras frentes de operação da mina, incluindo instrumentação, automação e engenharia.

A utilização de sistemáticas multivariadas mais complexas para identificação dos especialistas mais recomendados ao preenchimento da FMEA também é recomendada.

Avalia-se, ainda, a verificação da eficiência do plano de proposição de melhorias para identificação de graus de assertividade das ações propostas, haja vista que mudanças de comportamentos humanos permeiam questões emocionais, físicas, cognitivas e situacionais.

Sugerem-se, também, sistemáticas mais robustas para avaliação de colaboradores recém-contratados, o desenvolvimento de novos mecanismos para aumentar o MTTF e a utilização de métricas para avaliar a eficiência das melhorias e modificações apontadas.

# REFERÊNCIAS

AAIG. Potential Failure Mode and Effects Analyses (FMEA). Reference Manual. Foutrh Edition, 2008.

A. POUCET, Survey of methods used to assess human reliability in the human factors reliability benchmark exercise, in: Accident Sequence Modelling: Human Actions, System Response, Intelligent Decision Support, Eds.: G.E. Apostolakis, P. Kafka and G. Mancini (Elsevier Applied Science, London, 1988).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1994. Rio de Janeiro. NBR 5462, Confiabilidade e mantenabilidade - terminologia. Rio de Janeiro. 37p.

ANZANELLO, M. J. ; FOGLIATTO, F. S.; ROSSINI, K. Data mining-based method for identifying discriminant attributes in sensory profiling. Food Quality and Preference, p. 139-148, 2010.

BERTSCHI, B. Reliability in automotive and mechanical engineering: Determination of Component and System Reliability. Berlin: Springer. 2008.

BLACHE, M. K.; SHRIVASTAVA, B. A. Defining Failure of Manufacturing & Equipment. In: Annual Reliability and Maintain inability Symposium, 1994. Proceedings p. 69-75.

BORNIA, A. C. Mensuração das Perdas dos Processos Produtivos: Uma Abordagem Metodológica de Controle Interno. Florianópolis: UFSC - 1995 Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

CALILI, R. F.; COSTA, H. G.; QUELHAS, L. O.; SOUZA, R. C. Estudo de modelos decisórios para escolha de alternativas de usinas geradoras de energia elétrica: utilização dos métodos multicritério, 2010.

CALIL, L. F. P.. Proposta de uma abordagem para elaboração de FMECA. VIRTUAL, 2010.

PALLEROSI, C. A. Confiabilidade Humana - Conceitos, Análises, Avaliação e Desafios. All Print Editora (2011).

CHIARA, V. A human factors and reliability approach to clinical risk management: Evidence from Italian cases. Safety Science, 2010.

KIASSAT, C. SAFAEI, N. BANJEVIC, D. Choosing the optimal intervention method to reduce Human - related machine failures European Journal of Operational Research 233 (2013) 604 –612.

CRONBACH, L. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika.

NORMAN, D. A. New views of information processing: Implications for intelligent decision support systems, in: Intelligent Decision Aids in Process Environments, E. Hollnagel, G. Mancini & D. Woods (Eds.), NATO AS1 Series, (Springer-Verlag, Berlin, 1986).

DIAS, A. Confiabilidade na manutenção industrial. São João Del Rei, 2002. Disponível em:<http://www.icapdelrei.com.br/arquivos/artigos/confiabilidade_na_manutencao_industrial.pdf > Acesso em: 15 out.2009.

DIAS, A. 1996. Metodologia para análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 199p. Tese (Doutorado).

DIAS, A. et al., 2001. Confiabilidade na manutenção industrial., Florianópolis, SC Universidade Federal de Santa Catarina –UFSC .

ECAY, H. E. Confiabilidad Humana en Ambientes Industriales, 2007.

ELSAYED, E. A. System reliability engineering: lecture notes. Porto Alegre: UFRGS, 1992.

ELSAYED, E. A.. Reliability Engineering. New York: Prentice-hall, 1996. 737 p.

FERNANDES, J. M. R.. Proposição de Abordagem Integrada de Métodos da Qualidade Baseada no FMEA. Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2005. 118 p.

FIGUEROA, Celso L. Curso Confiabilidade Humana: Foco na elaboração de padrões e procedimentos. AREMAS - Reliability Engineering Solutions, in press, 2010.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D.. Confiabilidade e Manutenção Industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 265 p.

FREITAS & PALMA. Análise Quantitativa dos Efeitos Mecânicos de Rifteamento e Sedimentaçao da Bacia do Reconcavo. 2001.

FRENCH, S, Human reliability analysis: A critique and review for managers – Safety Science, 2011. v. 49, p. 753-763.

GILCHRIST, W. Modeling failure modes and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management, Bradford, v. 10, n. 5, p. 16-24, 1993.

GHASEMI, A., & HODKIEWICZ, M. R. (2012). Estimating mean residual life for a case study of rail wagon bearings. IEEE Transactions on Reliability, 61(3), 719 - 730.

HAMID, R. F.; NAVID, A. Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique, 2013.

VAN LEEUWEN, J.F. Risk analysis by FMEA as an element of analytical validation, 2013.

J. LAYZELL,J.; LEDBETTER, S. FMEA applied to cladding systems-reducing the risk of failure. Building Research & Information, 1998.

REASON, J. Modelling the basic error tendencies of human operators, in: Accident Sequence Modelling: Human Actions, System Response, Intelligent Decision Support, Eds.: G.E. Apostolakis, P. Kafka and G. Mancini (Elsevier Applied Science, London, 1988).

KOPPE, J.C. “A Lavra e a Indústria Mineral no Brasil”. In: Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral/Eds. Fernandes, F.R.C.; Luz, A.B.; Matos, G.M.M.; Castilhos, Z.C. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007, pp. 81-102.

LAFRAIA, J. R. B.. Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 374 p.

LAURENTI, R. Sistematização de problemas e práticas da análise de falhas pote4nciais no processo de desenvolvimento de produtos, 2010.

YING, L.; ZHIJIA, H.; LIANBAO, L. Motivation Mechanism of Accident Prevention in Coal Mine. International Symposium on Safety Science and Engineering in China, 2012 (ISSSE-2012).

LEVIN, M.; KALAL, T.T. Improving Pruduct Reliability. Strategies and implementation. West Sussex, England: Wiley, 2003.

MACHADO, I. F. “Mineração e Globalização”. In: Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral/Eds. Fernandes, F.R.C.; Luz, A.B.; Matos, G.M.M.; Castilhos, Z.C. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007, pp. 221-225.

MCDERMOTT; MIKULAK & BEAUREGARD, M.R. The Basics of FMEA (2009).

MAIDA, F.G. A Confiabilidade Humana em Unidades de Processamento de Refinarias de Petróleo. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.

MELLO, C. H. P.; SALGADO, E. G. Mapeamento dos processos em serviços: estudo de caso em duas pequenas empresas da área de saúde. In: ENEGEP, 25, 2005, Porto Alegre.

MONTGOMERY, M.T. New Insights into the Physics of Intense Storms. Part 2. Extreme Localized Wind, 2003.

NEVES, C.A.R.; SOUZA, A.E.; OLIVEIRA, M.R. & BARBOZA, V.L.A. (2005), Informe Mineral – Desenvolvimento & Economia Mineral, Publicação do Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 28p.

NOTTAR, L. Seleção de especialistas e de fatores qualitativos para ajuste da previsão de demanda na cadeia de lácteos. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2013.

CACCIABUE, P.C. Evaluation of Human Factors and Man-machine Problems in the Safety of Power Plants. Commission of the European Communities, Joint Research Centre lspra, 21020 lspra (Va), Italy (1988).

PINTO, F.; FOGLIATTO, F.; QANNARI, E. A Method for Panelists Consistency Assessment in Sensory Evaluations Based on the Cronbach s Alpha Coefficient. Food Quality and Preference, v. 32, p. 41-47, 2014.

PINHO, L.A. Failure Mode and Effect Analysis (FEMA): uma ferramenta para promoção da qualidade no Setor Fiscal das Empresas de serviços contábeis. Artigo apresentado no V SEGET – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (2008).

PTAK, C.A.; SCHRAGENHEIN, E. ERP: tools, techniques, and applications for integrating the supply chain. Boca Raton: St Lucie, the APICS series, 200, 424p.

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

Si, X. S., Wang, W., Hu, C. H., & Zhou, D. H. (2011). Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. European Journal of Operational Research, 213, 1–14.

SANTOS, J. P. Avaliação da confiabilidade humana, 2013. Edição 94 – Artigo: Recursos humanos. Disponível em: ttp://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/57-artigos-e-materias/1142-avaliacao-da-confiabilidade-humana.html.

SIQUEIRA, I. P.. Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005. 408 p.

SLACK, NIGEL ET AL. Administração da Produção, São Paulo, Atlas, 2002.

STAMATIS, D. H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution. 2. ed. ASQC, Milwaukee: Quality Press, 2003. 494 p.

TAVARES, L. A. Manutenção centrada no negócio. Rio de Janeiro: Gráfica e Editora Nat, 2005.

P. X. Thivel, Y. Bultel, F. Delpech. Risk analysis of a biomass combustion process using

MOSAR and FMEA methods. Journal of Hazardous Materials 151 (2008) 221–231.

TOLEDO, J. C.; AMARAL, D. C. FMEA: Análise do Tipo e Efeito de Falha, 2006. Disponível em: < http://www.gepeq.dep.ufscar.br/arquivos/FMEA-APOSTILA.pdf

TSENG, M. M.; QINHAI, M.; SU, C. J. Mapping Customers' Service Experience for Operations Improvement. Business Process Management Journal, v. 5, n. 1, p.50-64, 1999.

TAHO YANG. Improving the reliability of electronic paper display using FMEA and Taguchi methods: A case study, 2014.

# APÊNDICES

Apêndice A - Planilha FMEA para ER 151K-01 com modos de falhas Mecânicas preenchida por um dos especialistas

| FMEA | DATA DA EMISSÃO: 16/12/2013 | | |
|---|---|---|---|
| | ÚLTIMA REVISÃO: | NOME: EM(5) | |
| MANUTENÇÃO | RESPONSÁVEL: MANUEL NASCIMEN | | |
| ITEM: 001 | CONJUNTO: EMPILHADEIRA / RECUPERADORA DE MINÉRIO DE FERRO - ER 151-01 | | Mecânica |
| PARTICIPANTES: Supervisores de manutenção mecânica, Técnicos Mecânicos e Mecânicos | | | |

| SUB ITEM | COMPONENTE | FUNÇÃO | FALHAS POSSÍVEIS | | ÍNDICES | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | MODO | CAUSAS | D | O | S | SH |
| 1.1 | ER 151-01 | EMPILHAR E RECUPERAR MINÉRIO DE FERRO | 1 - Baixa Pressão no Sistema de Lubrificação | 1.1 - Falta de Lubrificação | 3 | 5 | 5 | 1 |
| | | | | 1.2 - Contaminação do lubrificante | 6 | 5 | 3 | 3 |
| | | | | 1.3 - Substituição inadequada de componentes (ex: Distribuidor). | 1 | 8 | 5 | 3 |
| | | | 2 - Defeito Mecânico no Sistema Hidráulico | 2.1 - Má Conexão dos Cabos de instrumentação/automação. | 5 | 3 | 5 | 1 |
| | | | | 2.2 - Lubrificante Inadequado | 3 | 3 | 5 | 3 |
| | | | | 2.3 - Falta de manutenção sistemática ou execução inadequada da mesma - MP | 3 | 5 | 8 | 10 |
| | | | 3 - Desalinhamento da Correia do Transportador | 3.1 - Limpeza Inadequada | 1 | 8 | 8 | 5 |
| | | | | 3.2 - Falha no Tensionamento | 1 | 1 | 3 | 8 |
| | | | | 3.3 - Sobrecarga na correia - Falha operacional operacional | 3 | 10 | 8 | 10 |
| | | | | 3.4 - Falha na inspeção sensitiva/detectiva. | 5 | 3 | 3 | 8 |
| | | | | 3.5 - Falha/Ausencia de instalação de rolos guias | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | | | 4 - Desgaste do Acoplamento Hidráulico (Hidrodinâmico) | 4.1 - Falha na Alinhamento | 6 | 3 | 8 | 8 |
| | | | | 4.2 - Falha no Torque dos parafusos | 3 | 3 | 5 | 8 |
| | | | | 4.3 - Sobrecarga - Falha Operacional | 1 | 5 | 8 | 8 |
| | | | | 4.4 - Reposição inadequada na quantidade e tipo de lubrificante (Máximo/Mínimo) | 8 | 1 | 8 | 10 |
| | | | 5 - Desgaste do Chute de Descarga | 5.1 - Falha de Inspeção | 5 | 8 | 5 | 5 |
| | | | | 5.2 - Reposição inadequada de chapa de desgaste. | 3 | 3 | 8 | 5 |
| | | | 6 - Desgaste do Rolete de Carga | 6.1 - Falhas de Inspeção | 5 | 5 | 8 | 5 |
| | | | | 6.2 - Limpeza Inadequada | 1 | 8 | 8 | 5 |
| | | | | 6.3 - Sobrecarga - Falha Operacional | 1 | 8 | 8 | 8 |
| | | | 7 - Deficiência de Lubrificação do Redutor da Roda de Caçambas | 7.1 - Falta de manutenção sistemática ou execução inadequada da mesma - MP | 3 | 3 | 10 | 8 |
| | | | | 7.2 - Lubrificante Inadequado | 5 | 1 | 5 | 8 |
| | | | | 7.3 - Reposição inadequada na quantidade e tipo de lubrificante (Máximo/Mínimo) | 1 | 1 | 8 | 8 |
| | | | | 7.4 - Contaminação do Lubrificante | 3 | 3 | 5 | 5 |

Apêndice A - Planilha FMEA para ER 151K-01 com modos de falhas Mecânicas preenchida por um dos especialistas (continuação)

| FMEA | DATA DA EMISSÃO: 16/12/2013 | |
|---|---|---|
| | ÚLTIMA REVISÃO: | NOME: EM(5) |
| MANUTENÇÃO | RESPONSÁVEL: MANUEL NASCIMEN | |
| ITEM: 001 | CONJUNTO: EMPILHADEIRA / RECUPERADORA DE MINÉRIO DE FERRO - ER 151-01 | Mecânica |

PARTICIPANTES: Supervisores de manutenção mecânica, Técnicos Mecânicos e Mecânicos

| SUB ITEM | COMPONENTE | FUNÇÃO | FALHAS POSSÍVEIS | | ÍNDICES | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | MODO | CAUSAS | D | O | S | SH |
| 1.1 | ER 151-01 | EMPILHAR E RECUPERAR MINÉRIO DE FERRO | 8 - Fixação inadequada do Redutor do Truque de Locomoção | 8.1 - Falha no Alinhamento | 6 | 3 | 5 | 8 |
| | | | | 8.2 - Falha no Torque dos parafusos | 5 | 3 | 5 | 8 |
| | | | | 8.3 - Substituição de componentes subdimensionados (Parafusos) | 6 | 1 | 5 | 8 |
| | | | 9 - Nível Baixo de Óleo no Acoplamento Hidráulico da Roda de Caçambas | 9.1 - Falha de inspeção (Vazamento) | 1 | 3 | 8 | 8 |
| | | | | 9.2 - Reposição insuficiente de lubrificante | 8 | 1 | 10 | 10 |
| | | | 10 - Quebra da Estrutura | 10.1 - Sobrecarga - Falha operacional | 3 | 8 | 10 | 8 |
| | | | | 10.2 - Velocidade da Correia Acima da Nominal | 5 | 3 | 8 | 8 |
| | | | | 10.3 - Choque mecânico Máquina na pilha - Falha operacional | 8 | 5 | 8 | 10 |
| | | | 11 - Quebra das Caçambas | 11.1 - Má fixação da roda de caçambas - Falha de montagem | 6 | 1 | 10 | 10 |
| | | | | 11.2 - Operação inadequada - Recuperação em translação. | 8 | 5 | 8 | 8 |
| | | | | 11.3 - Falta de manutenção sistemática ou execução inadequada da mesma - MP | 3 | 5 | 8 | 8 |
| | | | 12 - Quebra do Rolete de Carga | 12.1 - Falha na Inspeção | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | | 12.2 - Limpeza Inadequada | 3 | 10 | 8 | 8 |
| | | | | 12.3 - Sobrecarga - Falha operacional | 1 | 8 | 8 | 8 |
| | | | 13 - Quebra do Rolete de Impacto | 13.1 - Falha na Inspeção | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | | 13.2 - Limpeza Inadequada | 3 | 10 | 8 | 5 |
| | | | | 13.3 - Sobrecarga - Falha operacional | 1 | 8 | 8 | 8 |
| | | | 14 - Quebra do Rolete de Retorno | 14.1 - Falha na Inspeção | 6 | 10 | 5 | 5 |
| | | | | 14.2 - Limpeza Inadequada | 3 | 10 | 8 | 5 |
| | | | | 14.3 - Sobrecarga - Falha operacional | 1 | 8 | 8 | 8 |
| | | | 15 - Rolamento Danificado do Motor Elétrico | 15.1 - Deficiência de lubrificação - Falta ou excesso | 3 | 3 | 8 | 5 |
| | | | | 15.2 - Montagem inadequada de componentes | 5 | 1 | 10 | 5 |
| | | | 16 - Rolamento Danificado do Redutor do Truque de Locomoção | 16.1 - Lubrificante Inadequado | 3 | 3 | 8 | 5 |
| | | | | 16.2 - Falha na Montagem | 3 | 3 | 8 | 5 |
| | | | | 16.3 - Contaminação do Lubrificante | 3 | 8 | 5 | 3 |
| | | | | 16.4 - Degradação química do lubrificante | 3 | 5 | 5 | 3 |

Apêndice A - Planilha FMEA para ER 151K-01 com modos de falhas Mecânicas preenchida por um dos especialistas (continuação)

| FMEA | DATA DA EMISSÃO: 16/12/2013 | |
|---|---|---|
| | ÚLTIMA REVISÃO: | NOME: EM(5) |
| MANUTENÇÃO | RESPONSÁVEL: MANUEL NASCIMENT | |
| ITEM: 001 | CONJUNTO: EMPILHADEIRA / RECUPERADORA DE MINÉRIO DE FERRO - ER 151-01 | Mecânica |

PARTICIPANTES: Supervisores de manutenção mecânica, Técnicos Mecânicos e Mecânicos

| SUB ITEM | COMPONENTE | FUNÇÃO | FALHAS POSSÍVEIS | | ÍNDICES | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | MODO | CAUSAS | D | O | S | SH |
| 1.1 | ER 151-01 | EMPILHAR E RECUPERAR MINÉRIO DE FERRO | 17 - Travamento do Rolete de Carga | 17.1 - Limpeza Inadequada | 3 | 10 | 8 | 5 |
| | | | | 17.2 - Montagem incorreta | 5 | 3 | 8 | 8 |
| | | | 18 - Defeito Emenda da Correia do Transportador | 18.1 - Tempo de cura insuficiente | 5 | 3 | 10 | 8 |
| | | | | 18.2 - Aplicação de produtos inadequados | 6 | 1 | 10 | 8 |
| | | | | 18.3 - Falta de limpeza da superfície | 5 | 3 | 8 | 5 |
| | | | 19 - Rasgo da Correia do Transportador | 19.1 - Erro no Processo de Soldagem | 3 | 1 | 5 | 5 |
| | | | | 19.2 - Falha na Inspeção detectiva | 3 | 3 | 5 | 3 |
| | | | | 19.3 - Ferramentas e materias esquecidos durante a manutenção. | 8 | 1 | 8 | 8 |
| | | | | 19.4 - Falha na montagem de guias laterais na saída de chutes. | 1 | 3 | 8 | 8 |
| | | | 20 - Rasgo de Borda da Correia do Transportador | 20.1 - Limpeza Inadequada | 1 | 5 | 8 | 8 |
| | | | | 20.2 - Falha no Tensionamento da Correia | 3 | 3 | 5 | 5 |
| | | | | 20.3 - Falta de inspeção | 5 | 8 | 5 | 8 |

Apêndice B - Planilha FMEA para ER 151K-01 com modos de falhas Elétricas preenchida por um dos especialistas

| FMEA | DATA DA EMISSÃO: 16/12/2013 | | |
|---|---|---|---|
| | ÚLTIMA REVISÃO: | NOME: EE(3) | |
| MANUTENÇÃO | RESPONSÁVEL: MANUEL NASCIMEN | | |
| ITEM: 002 | CONJUNTO: EMPILHADEIRA / RECUPERADORA DE MINÉRIO DE FERRO - ER 151-01 | | Elétrica |
| PARTICIPANTES: Supervisores de manutenção elétrica, Técnicos Eletro-eletrônicos e eletricistas | | | |

| SUB ITEM | COMPONENTE | FUNÇÃO | FALHAS POSSÍVEIS | | ÍNDICES | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | MODO | CAUSAS | D | O | S | SH |
| 1.1 | ER 151-01 | EMPILHAR E RECUPERAR MINÉRIO DE FERRO | 1 - Corrente Alta no Motor Elétrico da Roda de Caçambas | 1.1 - Sobrecarga - parâmetros mal ajustados | 3 | 1 | 3 | 1 |
| | | | | 1.2 - Falha operacional | 10 | 8 | 8 | 8 |
| | | | | 1.3 - Falha no aperto das conexões elétricas do motor | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | | | 2 - Corrente Alta no Moto-Redutor de Locomoção | 2.1 - Ineficiência na limpeza do trilho | 8 | 3 | 5 | 1 |
| | | | | 2.2 - Montagem e ajuste incorretos | 3 | 3 | 3 | 1 |
| | | | 3 - Curto-circuito na Chave de Emergência | 3.1 - Vedação da caixa de ligação ineficiente. | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | | 3.2 - Quebra de tubulação por terceiros | 8 | 8 | 5 | 8 |
| | | | 4 - Curto-circuito no Circuito de Força | 4.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 5 | 5 | 1 |
| | | | | 4.2 - Fusível mal dimensionado | 8 | 3 | 8 | 5 |
| | | | | 4.3 - Falha no cumprimento da MP | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | 5 - Curto-circuito no Contator | 5.1 Aperto inadequado das conexões | 3 | 5 | 5 | 3 |
| | | | | 5.2 - Fusível mal dimensionado | 8 | 3 | 8 | 5 |
| | | | | 5.3 - Falha no cumprimento da MP | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | 6 - Curto-circuito no Moto-Redutor de Giro | 6.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 5 | 5 | 3 |
| | | | | 6.2 - Falha no cumprimento da MP (limpeza / isolação, etc.) | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | 7 - Curto-circuito no Moto-Redutor de Locomoção | 7.1 Aperto inadequado das conexões | 3 | 3 | 5 | 5 |
| | | | | 7.2 - Falha no cumprimento da MP (limpeza / isolação, etc.) | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | 8 - Curto-circuito no Transformador | 8.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 5 | 5 | 3 |
| | | | | 8.2 - Limpeza inadequada | 8 | 8 | 8 | 3 |
| | | | | 8.3 - Excesso de carga | 10 | 10 | 8 | 3 |
| | | | 9 - Defeito no Circuito de Comando | 9.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 5 | 5 | 3 |
| | | | | 9.2 - Vedação da caixa de ligação ineficiente. | 6 | 8 | 5 | 5 |
| | | | 10 - Defeito Circuito de Comando do Contator | 10.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 3 | 5 | 5 |
| | | | 11 - Defeito na Gaveta do Contator | 11.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 3 | 5 | 5 |
| | | | | 11.2 - Inversão nas conexões do swith | 6 | 8 | 8 | 8 |
| | | | | 11.3 - Limpeza inadequada | 8 | 8 | 8 | 3 |
| | | | | 11.4 - Subdimensionamento de componentes | 6 | 5 | 5 | 5 |

Apêndice B - Planilha FMEA para ER 151K-01 com modos de falhas Elétricas preenchida por um dos especialistas (continuação)

| FMEA | DATA DA EMISSÃO: 16/12/2013 | | |
|---|---|---|---|
| | ÚLTIMA REVISÃO: | NOME: EE(3) | |
| MANUTENÇÃO | RESPONSÁVEL: MANUEL NASCIMEN | | |
| ITEM: 002 | CONJUNTO: EMPILHADEIRA / RECUPERADORA DE MINÉRIO DE FERRO - ER 151-01 | | Elétrica |
| PARTICIPANTES: Supervisores de manutenção elétrica, Técnicos Eletro-eletrônicos e eletricistas | | | |

| SUB ITEM | COMPONENTE | FUNÇÃO | FALHAS POSSÍVEIS | | ÍNDICES | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | MODO | CAUSAS | D | O | S | SH |
| 1.1 | ER 151-01 | EMPILHAR E RECUPERAR MINÉRIO DE FERRO | 12 - Defeito na Gaveta do Motor | 12.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 5 | 5 | 3 |
| | | | | 12.2 - Inversão nas conexões do swith | 6 | 8 | 8 | 8 |
| | | | | 12.3 - Limpeza inadequada | 8 | 8 | 8 | 3 |
| | | | | 12.4 - Subdimensionamento de componentes | 6 | 5 | 5 | 3 |
| | | | 13 - Defeito no Cabeamento do Circuito | 13.1 - Subdimensionamento de cabos elétricos | 6 | 5 | 5 | 5 |
| | | | 14 - Defeito no Circuito de Comando do Disjuntor | 14.1 - Inversão nas conexões do swith | 6 | 8 | 8 | 8 |
| | | | | 14.2 - 1Limpeza inadequada | 8 | 8 | 8 | 3 |
| | | | | 14.3 Subdimensionamento de componentes | 6 | 5 | 5 | 3 |
| | | | 15 - Desarme do Contator | 15.1 Sobrecarga | 10 | 10 | 8 | 8 |
| | | | | 15.2 - Falha operacional | 8 | 3 | 8 | 8 |
| | | | 16 - Falha no Relé de Sobrecarga do Circuito de Força | 16.1 - Parametrização inadequada | 8 | 5 | 8 | 8 |
| | | | | 16.2 - aperto inadequado nas conexões | 3 | 3 | 5 | 5 |
| | | | 17 - Fixação da Chave de Emergência | 17.1 - Aperto inadequado da chave | 1 | 5 | 5 | 5 |
| | | | 18 - Mau Contato no Cabo de Alimentação | 18.1 - Aperto inadequado das conexões | 3 | 3 | 5 | 5 |
| | | | 19 - Desarme do Disjuntor | 19.1 - Sobrecarga / Falha Operacional | 3 | 3 | 5 | 5 |
| | | | 20 - Mau Contato no Freio | 20.1 - Aperto inadequado das conexões | 6 | 5 | 8 | 5 |
| | | | 21 - Sobrecarga no Circuito de Força | 21.1 - Sobrecarga - Falha operacional | 6 | 8 | 8 | 8 |

Apêndice C - Tabela de probabilidade dos índices de Detecção, Ocorrência, Severidade e Severidade Humana utilizados no preenchimento da FMEA.

| **Probabilidade de Detecção (D)** | | |
|---|---|---|
| Muito Remota | 10 | Os controles não irão detectar esse modo de falha ou não existem controles |
| Remota | 8 | Os controles provavelmente não irão tectar esse modo de falha. |
| Baixa | 6 | Há uma baixa probabilidade de os controles detectarem esse modo de falha |
| Moderada | 5 | Os controles podem detectar o modo de falha |
| Alta | 3 | Há uma alta probabilidade de os controles detectarem esse modo de falha |
| Muito Alta | 1 | É quase certo que os controles irão detectar esse modo de falha |

| **Probabilidade de Ocorrência (O)** | | |
|---|---|---|
| Remota | 1 | A falha é Improvável |
| Baixa | 3 | Relativamente poucas falhas |
| Moderada | 5 | Falhas Ocasionais |
| Alta | 8 | Falhas Repetitivas |
| Muito Alta | 10 | Falhas quase que inevitáveis |

| **Severidade (S)** | | |
|---|---|---|
| Mínima | 1 | Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema, e a maioria dos clientes talvez nem note sua ocorrência |
| Baixa | 3 | Quando provoca alguma insatisfação, o cliente observa apenas uma leve deterioração ou queda no desempenho |
| Moderada | 5 | Quando provoca alguma insatisfação, devido a queda no desempenho ou mau funcionamento de partes do sistema |
| Alta | 8 | Quando provoca alta insatisfação do cliente, por exemplo, equipamento não opera sem comprometer a segurança ou implicar em improvisação |
| Muito Alta | 10 | Quando compromete a segurança da operação ou envolve improvisações, infração a regulamentos e normas. |

| **Severidade Humana (SH)** | | |
|---|---|---|
| Leve | 1 | Falha que pode ocasionar acidentes que demandam somente primeiros socorros ou impacto ambiental não significativo |
| Moderada | 3 | Falha que pode ocasionar acidentes sem afastamento (com restrição, com tratamento médico), ou dano ambiental a área do empreendimento |
| Grave | 5 | Falha que pode ocasinar Acidentes com afastamento, ou dano ambiental restrito à área do empreendimento e afetando ecossistemas comuns |
| Crítica | 8 | Falha que pode ocasionar acidentes incapacitantes permanentes ou 01 (uma) fatalidade; Dano ambiental que alcança áreas externas à instalação |
| Catastrófica | 10 | Falha que pode ocasionar acidente resultando em mais de 01 (uma) fatalidade; Danos ambientais Dano ambiental que alcança áreas externas à instalação, afetando ecossistemas comuns que abrigam espécies raras. |

Apêndice D - Tabela com cálculos dos RPNs>100 para modos de falhas mecânicas.

| Mecânica | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices D | 1.2 | 1.3 | 3.3 | 4.2 | 4.4 | 7.1 | 8.3 | 10.1 | 10.3 | 11.2 | 11.3 | 12.2 | 13.1 | 14.1 | 14.2 | 15.2 | 16.1 | 16.2 | 16.4 | 17.1 | 18.1 | 18.2 | 18.3 | 19.3 | 19.4 |
| D M1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 5 | 5 | 3 | 5 | 1 |
| D M2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 3 | 1 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| D M4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 6 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| D M5 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 6 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 3 | 6 | 8 | 6 | 6 | 5 |
| D M7 | 6 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 8 | 3 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 8 | 8 | 8 | 6 | 5 |
| D M10 | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |
| D M12 | 6 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |
| D M16 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 5 | 8 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 6 | 6 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |
| D M17 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 10 | 6 | 6 |
| D M18 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| D M19 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 |
| D M20 | 10 | 6 | 8 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| D Mediano | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |

| Mecânica | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices O | 1.2 | 1.3 | 3.3 | 4.2 | 4.4 | 7.1 | 8.3 | 10.1 | 10.3 | 11.2 | 11.3 | 12.2 | 13.1 | 14.1 | 14.2 | 15.2 | 16.1 | 16.2 | 16.4 | 17.1 | 18.1 | 18.2 | 18.3 | 19.3 | 19.4 |
| O M1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 5 | 5 | 3 | 5 | 1 |
| O M2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 3 | 1 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| O M4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 6 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 |
| O M5 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 6 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 3 | 6 | 8 | 6 | 6 | 5 |
| O M7 | 6 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 8 | 3 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 8 | 8 | 8 | 6 | 5 |
| O M10 | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |
| O M12 | 6 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |
| O M16 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 5 | 8 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 6 | 6 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |
| O M17 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 10 | 6 | 6 |
| O M18 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| O M19 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 |
| O M20 | 10 | 6 | 8 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| O Mediano | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 |

| Mecânica | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices S | 1.2 | 1.3 | 3.3 | 4.2 | 4.4 | 7.1 | 8.3 | 10.1 | 10.3 | 11.2 | 11.3 | 12.2 | 13.1 | 14.1 | 14.2 | 15.2 | 16.1 | 16.2 | 16.4 | 17.1 | 18.1 | 18.2 | 18.3 | 19.3 | 19.4 |
| S M1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| S M2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| S M4 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S M5 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S M7 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S M10 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S M12 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S M16 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S M17 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S M18 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| S M19 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| S M20 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| S Mediano | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

| Mecânica | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices SH | 1.2 | 1.3 | 3.3 | 4.2 | 4.4 | 7.1 | 8.3 | 10.1 | 10.3 | 11.2 | 11.3 | 12.2 | 13.1 | 14.1 | 14.2 | 15.2 | 16.1 | 16.2 | 16.4 | 17.1 | 18.1 | 18.2 | 18.3 | 19.3 | 19.4 |
| SHH M1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SH M2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SH M4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SH M5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| SH M7 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| SH M10 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| SH M12 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| SH M16 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| SH M17 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| SH M18 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| SH M19 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| SH M20 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SH Mediano | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| RPN | 110 | 139 | 105 | 104 | 147 | 164 | 111 | 111 | 160 | 180 | 139 | 108 | 110 | 104 | 104 | 117 | 108 | 117 | 108 | 127 | 111 | 111 | 111 | 108 | 139 |

Apêndice E - Tabela com cálculos dos RPNs>100 para modos de falhas Elétricas

| ELÉTRICA | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices D | 2.1 | 5.1 | 5.3 | 6.1 | 9.2 | 10.1 | 14.1 | 14.2 | 15.1 | 20.1 | 21.1 |
| D E1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| D E3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 1 | 6 | 1 | 1 | 1 |
| D E5 | 5 | 3 | 6 | 5 | 6 | 3 | 1 | 8 | 1 | 3 | 1 |
| D E7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 3 | 8 | 1 | 5 | 1 |
| D E8 | 8 | 6 | 8 | 6 | 8 | 8 | 5 | 8 | 5 | 6 | 5 |
| D E9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 5 | 10 | 6 | 8 | 5 |
| D E12 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 6 | 10 | 8 | 10 | 6 |
| D E13 | 10 | 8 | 10 | 8 | 10 | 8 | 6 | 10 | 10 | 10 | 6 |
| D E14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| D Mediano | 8 | 6 | 8 | 6 | 8 | 8 | 5 | 8 | 5 | 6 | 5 |

| ELÉTRICA | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices O | 2,1 | 5,1 | 5,3 | 6,1 | 9,2 | 10,1 | 14,1 | 14,2 | 15,1 | 20,1 | 21,1 |
| O E1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| O E3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 |
| O E5 | 5 | 3 | 2 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 |
| O E7 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| O E8 | 8 | 5 | 8 | 5 | 8 | 3 | 8 | 8 | 5 | 5 | 5 |
| O E9 | 8 | 5 | 8 | 5 | 8 | 3 | 8 | 8 | 8 | 5 | 5 |
| O E12 | 8 | 8 | 8 | 5 | 8 | 5 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 |
| O E13 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| O E14 | 10 | 8 | 10 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| O Mediano | 8 | 5 | 8 | 5 | 8 | 3 | 8 | 8 | 5 | 5 | 5 |

| ELÉTRICA | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices S | 2,1 | 5,1 | 5,3 | 6,1 | 9,2 | 10,1 | 14,1 | 14,2 | 15,1 | 20,1 | 21,1 |
| S E1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| S E3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| S E5 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| S E7 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S E8 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S E9 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| S E12 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| S E13 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| S E14 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| S Mediano | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

| ELÉTRICA | MODOS DE FALHAS | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indices SH | 2,1 | 5,1 | 5,3 | 6,1 | 9,2 | 10,1 | 14,1 | 14,2 | 15,1 | 20,1 | 21,1 |
| SH E1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SH E3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SH E5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| SH E7 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| SH E8 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| SH E9 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| SH E12 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| SH E13 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| SH E14 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| SH Mediano | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| RPN | 111 | 116 | 143 | 116 | 143 | 120 | 155 | 143 | 125 | 116 | 125 |