Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA: APLICAÇÃO NA INJEÇÃO DE ÁGUA PARA RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO.

Júlio César dos Santos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do grau em MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira Fontes.

Natal
Julho/ 2011

Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Setorial de Engenharia Mecânica

Santos, Júlio César dos.

Análise de confiabilidade de uma bomba centrífuga: aplicação na injeção de água para recuperação de petróleo/ Júlio César dos Santos. – Natal, RN, 2011.

147 f.: il.

Orientador: Francisco de Assis Oliveira Fontes

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia de Mecânica.

1. Bomba centrífuga – Dissertação. 2. Confiabilidade – Dissertação. 3. Manutenção – Dissertação. I. Fontes, Francisco de Assis Oliveira. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BSEEM CDU 621.671

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA: Aplicação na Injeção de Água para Recuperação de Petróleo.

JÚLIO CÉSAR DOS SANTOS

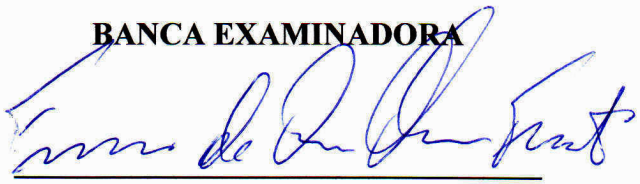
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Dr. Francisco de Assis Oliveira Fontes - Orientador

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Francisco de Assis de Oliveira Fontes - Presidente (UFRN)

Prof. Dr. Cleiton Rubens Formiga Barbosa – Membro interno (UFRN)

Prof. Dr. Marciano Furukava– Membro interno (UFRN)

Prof. Dr. Kleiber Lima de Bessa– Membro externo (UFERSA)

“Não há nada como o sonho para criar o futuro. Utopia hoje, carne e osso amanhã.”

Victor Hugo

A todos os engenheiros
que desejam fazer um mundo melhor através do conhecimento e da sabedoria:

Com o conhecimento
serão capazes de modificar o que existe para melhor;

Com a sabedoria saberão empregar o que melhoraram para o bem da humanidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade que me deu em fazer algo para o crescimento intelectual de nossa comunidade e de contribuição à indústria.

A minha família, que mesmo distante torce por mim!

Aos amigos e aqueles que acreditaram no meu potencial. O meu agradecimento especial a engenheira Ana Claudia Medeiros, pelo incentivo, e ao engenheiro Gonzalo Javier Alvarado Zamora pela contribuição com sua experiência na área da Confiabilidade.

A Petrobras, por permitir e colaborar com esta obra.

Ao Prof. Francisco Fontes, meu orientador, pela sua condução sobre o meu trabalho e pela amizade.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS ..... **i**

LISTA DE FIGURAS ..... **ii**

LISTA DE QUADROS ..... **iv**

LISTA DE TABELAS ..... **v**

LISTA DE PLANILHAS ..... **vi**

RESUMO ..... **vii**

ABSTRACT ..... **viii**

1. INTRODUÇÃO **5**

1.1. OBJETIVO GERAL **7**

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS **7**

2. CONTEXTO E TECNOLOGIA NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO **9**

2.1 PRODUÇÃO EM TERRA NO RN **9**

2.2 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO **13**

2.2.1 Métodos convencionais de recuperação **14**

2.2.2 Projeto de injeção de água produzida **14**

2.2.2.1 Fluido Injetado **16**

2.2.3 Sistema de Injeção de Água Produzida **17**

2.2.3.1 Aspectos Operacionais da Injeção de Água **17**

2.3 MOTOBOMBAS CENTRÍFUGAS **18**

2.3.2 Monitoração **20**

2.3.3 Operação **20**

2.3.3.1 Operação com fluxo reduzido **21**

2.3.3.2 Escorva **21**

2.3.3.3 Partidas e paradas **21**

2.3.3.4 Funcionamento de um Bomba Centrífuga de Múltiplos estágios **23**

2.3.3.5 Ponto de operação **24**

2.3.3.6 Controles operacionais **25**

2.4 CONFIABILIDADE **26**

2.4.1 Confiabilidade de sistemas **32**

2.4.1.1 Confiabilidade de bombas **34**

2.4.2 Ferramentas da confiabilidade **37**

2.4.2.1 FMEA – Modos de falhas e seus efeitos **37**

2.4.2.2 Árvore de Falhas **39**

2.4.2.4 Simulação **42**

2.4.2.4.1 Simulação de Monte Carlo **43**

2.4.3 Banco de dados **44**

2.4.3.1 Oreda **45**

2.4.4 Política de manutenção baseada na confiabilidade **50**

3. MATERIAIS E MÉTODOS **54**

3.1 METODOLOGIA PROPOSTA **54**

3.2.1 Árvore funcional da bomba centrífuga **57**

3.2.1.1 Descrição funcional **57**

3.2.2 Elaboração da FMEA **58**

3.2.3 Elaboração da FTA **61**

3.2.3.1 Seleção do evento topo **61**

3.2.3.2 Fatores contribuintes **61**

3.2.3.3 Dados quantitativos **62**

3.2.3.4 Cálculo da Probabilidade de Ocorrência **62**

3.3 CICLO DE VIDA DO EQUIPAMENTO **65**

3.3.1 Primeiro cenário: sem MC **65**

3.3.1.1 Campanha de uma estação de injeção d`água **65**

3.3.2 Segundo cenário: com MC **65**

3.3.2.1 MC 65

3.4 USO DO SOFTWARE BLOCKSIM 65

3.4.1 Criando um bloco ou porta lógica no BlockSim 67

3.4.2 Parâmetros de operação, manutenção e controle para simulação no BlockSim. 70

3.4.2.1 Dados para simulação 70

3.4.2.2 Dados para confiabilidade 71

3.4.2.3 Dados para manutenção 72

3.4.3 Cálculo da confiabilidade - C 74

3.4.4 Cálculo da dispinibilidade média e mantenabilidade – D 75

3.4.5 Probabilidade de falhas F(f) 75

3.4.6 Criticidade de falha 76

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 78

4.1 FMEA 78

4.1.1 Carcaça 78

4.1.1.1 Motivo 79

4.1.1.2 Modo de falha 79

4.1.1.2.1 Efeitos potenciais da falha 79

4.1.1.3 Mecanismo de dano e falhas 79

4.1.1.4 Severidade do evento por rachadura ou degradação 79

4.1.1.5 Freqüência 80

4.1.1.6 Criticidade 81

4.1.1.7 Detecção 81

4.1.1.8 NPR 82

4.1.2 Eixo 82

4.1.2.1 Motivo 82

4.1.2.2 Modo de falha 82

4.1.2.3 Efeito potencial da falha 82

4.1.2.4 Mecanismo de dano e falhas **82**

4.1.2.5 Severidade do evento por Quebra **83**

4.1.2.6 Freqüência **84**

4.1.2.7 Criticidade **84**

4.1.2.8 Detecção **84**

4.1.3 Disco de Equilíbrio **85**

4.1.3.1 Motivo **86**

4.1.3.2 Modo de falha **86**

4.1.3.3 Efeito potencial da falha **86**

4.1.3.4 Mecanismo de dano e falhas **86**

4.1.3.5 Severidade do evento por Quebra **86**

4.1.3.6 Freqüência **87**

4.1.3.6.1 Criticidade **88**

4.1.3.7 Detecção **88**

4.1.3.8 NPR **89**

4.1.4 Selo Mecânico **89**

4.1.4.1 Motivo **89**

4.1.4.2 Modo de falha **89**

4.1.4.2.1 Efeito potencial da falha **89**

4.1.4.3 Mecanismo de dano e falhas **90**

4.1.4.4 Severidade do evento por Quebra **90**

4.1.4.5 Freqüência **91**

4.1.4.6 Criticidade **91**

4.1.4.7 Detecção **92**

4.1.4.8 NPR **92**

4.1.5 Skid **92**

4.1.5.1 Motivo **93**

4.1.5.2 Modo de falha **93**

4.1.5.3 Efeito potencial da falha **93**

4.1.5.4 Mecanismo de dano e falhas **93**

4.1.5.5 Severidade do evento por Vibração **93**

4.1.5.6 Freqüência **94**

4.1.5.7 Criticidade **95**

4.1.5.8 Detecção **95**

4.1.5.9 NPR **95**

4.1.6 Impelidor **96**

4.1.6.1 Motivo **96**

4.1.6.2 Modo de falha **96**

4.1.6.3 Efeito potenciais da falha **96**

4.1.6.4 Mecanismo de dano e falhas **96**

4.1.6.5 Severidade do evento por Rachadura ou Degradação **96**

4.1.6.6 Criticidade **98**

4.1.6.7 Detecção **99**

4.1.6.8 NPR **99**

4.1.7 Mancal **99**

4.1.7.1 Motivo **100**

4.1.7.2 Modo de falha **100**

4.1.7.3 Efeito potencial da falha **100**

4.1.7.4 Mecanismo de dano e falhas **100**

4.1.7.5 Severidade do evento por Aquecimento do mancal **100**

4.1.7.6 Freqüência **101**

4.1.7.7 Criticidade **102**

4.1.7.8 Detecção **102**

4.1.7.9 NPR **103**

4.1.8 Comando **103**

4.1.8.1 Motivo **103**

4.1.8.2 Modo de falha **103**

4.1.8.3 Efeito potencial da falha **103**

4.1.8.4 Mecanismo de dano e falhas **104**

4.1.8.5 Severidade do evento por Falta de Eletricidade **104**

4.1.8.6 Freqüência **105**

4.1.8.7 Criticidade **105**

4.1.8.8 Detecção **106**

4.1.8.9 NPR **106**

4.1.9 Motor **106**

4.1.9.1 Motivo **107**

4.1.9.2 Modo de falha **107**

4.1.9.3 Efeito potenciais da falha **107**

4.1.9.4 Mecanismo de dano e falhas **107**

4.1.9.5 Severidade do evento por Falta de Eletricidade **107**

4.1.9.6 Freqüência **108**

4.1.9.7 Criticidade **109**

4.1.9.8 Detecção **109**

4.1.9.9 NPR **110**

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E EFEITOS – FMEA **110**

4.3 NPR Versus Classificação N-2781 de Criticidade **111**

4.4 RESULTADO QUANTITATIVO DA ANÁLISE DE VIDA DA BOMBA CENTRÍFUGA **113**

4.4.1 Primeiro Cenário: Sem Manutenção **114**

4.4.1.1 Confiabilidade 1º Cenário **115**

4.4.1.2 Disponibilidade média 1º Cenário **115**

4.4.1.3 Resultado Individual **116**

4.4.1.3.1 Selos 1 e 2 ..... **116**

4.4.1.3.2 Carcaça da Bomba Centrífuga **117**

4.4.1.3.3 Eixo da Bomba Centrífuga **117**

4.4.1.3.4 Impelidor da Bomba Centrífuga **118**

4.4.1.3.5 Skid; Mancal Descarga; Mancal Sucção; Comando; Motor; Disco de equilíbrio .. **119**

4.4.2 Gráfico da Confiabilidade **121**

4.4.3 Segundo Cenário: com Manutenção Corretiva **123**

4.4.3.1 Confiabilidade 2º Cenário **123**

4.4.3.2 Disponibilidade média no 2º Cenário **124**

4.4.3.3 Resultado Individual no Segundo Cenário **125**

4.4.3.3.1 Selos 1 e 2 no Segundo Cenário **125**

4.4.3.3.2 Carcaça da Bomba Centrífuga **126**

4.4.3.3.3 Eixo da Bomba Centrífuga **126**

4.4.3.3.4 Impelidor da Bomba Centrífuga **127**

4.4.3.3.5 Skid; Mancal Descarga; Mancal Sucção; Comando; Motor; Disco de equilíbrio .. **127**

4.4.4 Comparativo dos resultados do Primeiro Cenário versus Segundo Cenário com o resultado qualitativo do FMEA. **131**

4.4.4.1 Selos Mecânicos 1 e 2 ..... **131**

4.4.4.2 Carcaça da bomba centrífuga **132**

4.4.4.3 Eixo da Bomba Centrífuga **132**

4.4.4.4 Impelidor da Bomba Centrífuga **132**

4.4.4.5 O Skid, Mancais de sustentação do eixo, Comando elétrico do motor, Motor e o Disco de Equilíbrio. **133**

5. CONCLUSÃO **136**

5.1 FMEA **136**

5.2 FTA **137**

5.3 Oreda **137**

5.4 BLOCKSIM 137

6. SUGESTÕES **139**

7. REFERÊNCIAS BILIOGRÁFIACAS **141**

APÊNDICE A **145**

APÊNDICE B **149**

ANEXOS A **152**

ANEXOS B **156**

LISTA DE SIGLAS

APR ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCOS

API *American Petroleum Institute*

ANM Árvore de Natal Molhada

BEP *Best Eficient Point* (Ponto de melhor eficiência)

CDRM Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais

CNP Conselho Nacional de Petróleo

Conesp Companhia Nordestina de Sondagem e Perfuração

CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

FDP Função Densidade de Probabilidade

FMEA *Failure Mode Efects Analysis* (Análise de efeitos dos modos de falhas)

FTA *Failure Tree Analysis* (Análise da árvore de falhas)

Hazop *Hazard and Operability* (Estudo sobre a operação e seus perigos)

Hazid *Hazard indentification* (Estudo sobre a indentificação de perigos)

LCC *Life Cycle Cost* (Custo do ciclo de vida)

MC Manutenção Corretiva

MP Manutenção Preventiva

MTBF *Mean-Time Between Failure* (Tempo médio entre falhas)

MTTF *Mean-Time to Failure* (Tempo médio até a falha)

MTTR *Mean-Time to Repair* (Tempo médio para reparo)

TMAPF (Tempo médio até a primeira falha)

Oreda *Offshore Reliability Data* (Dados de confiabilidade da produção no mar)

QMC Quantidade de Manutenção Corretiva

QMP Quantidade Manutenção Preventiva

QF Quantidade de Falhas

RAO Razão Água/Óleo

RAMS *Reliability, Availability, Maintenance and Safety* (confiabilidade, disponibilidade, mantenabilidade e segurança de equipamentos)

RBD *Reliability Bock Diagram* (Diagramas de blocos de confiabilidade)

RCM *Reliability Centered Maintenace* (Manutenção centrada em confiabilidade)

RS DECI *ReliaSoft Downing Event Criticality Index* (Índice ReliaSoft de criticidade de falhas com paradas do equipamento)

RS FCI *ReliaSoft Failure Cricality Index* (Índice ReliaSoft de criticidade de falhas)

SMS Segurança, Meio ambiente e Saúde

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Poços de injeção e de produção distribuídos de maneira homogênea em todo o reservatório. 16
Figura 2 - Classificação Geral das Bombas 18
Figura 3 - Classificação detalhada das bombas 19
Figura 4 - Partida de uma Motobomba 22
Figura 5 - Ponto de melhor eficiência, BEP. 24
Figura 6 - Função de Probabilidade Acumulada F(t). 27
Figura 7 - Função de Confiabilidade R(t) 28
Figura 8 - Representação da Curva da Banheira. 31
Figura 9 - Tela inicial do Block Sim 41
Figura 10 - Fluxograma da política de manutenção baseada em confiabilidade 52
Figura 11 - Fluxograma da análise de confiabilidade de uma bomba centrífuga Metodologia 56
Figura 12 - Diagrama funcional proposto para bomba centrífuga 57
Figura 13 - Diagrama de árvore de falhas da bomba centrífuga. 64
Figura 14 - Mudança de RDB para FTA 66
Figura 15 - Propriedade do item: nome do bloco. 67
Figura 16 - Escolha do parâmetro de distribuição: Exponencial 68
Figura 17 - Entrada de dados, parâmetros para simulação da confiabilidade no FTA 71
Figura 18 - Entrada de dados, parâmetros de confiabilidade 1º e 2º cenários 72
Figura 19 - Entrada de dados, parâmetros de Manutenção 1º Cenário 73
Figura 20 - Entrada de dados, parâmetros de Manutenção do 2º Cenário. 74
Figura 21 - Simulador, 10.000 eventos 114
Figura 22- Gráfico da ConfiabilidadeI 121
Figura 23-Gráfico da Probabilidade de Falha I. 122
Figura 24- Gráfico da Disponibilidade I 123
Figura 25- Gráfico da Confiabilidade II 129
Figura 26- Gráfico da Probabilidade II 130
Figura 27- Gráfico da Disponibilidade II 130
Figura 28 - Fluxograma de um sistema de injeção de água 146

Figura 29 - Bomba centrífuga de múltiplos estágios. 147
Figura 30 - Conjunto motor-bomba. 147
Figura 31 - Curvas de desempenho da bomba 156
Figura 32 - Curvas altura manométrica versus vazão 157
Figura 33 - Curva rendimento versus vazão 158
Figura 34 - Curvas NPSH versus vazão 158
Figura 35 - Curva potência versus vazão 159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Manobras Operacionais. 25
Quadro 2 – Sistemas e equipamentos considerados nas edições do Oreda. 47
Quadro 3 - Modelo da página do Oreda para apresentação dos dados. 48
Quadro 4 - Nomenclatura dos modos de falha para bombas centrífugas 50
Quadro 5 – Resumo das taxas de falhas (λ) 69
Quadro 6 - Resultado dos cálculos do MTTF 70
Quadro 8 - NPR, Nível de Proteção e Risco. 112
Quadro 7 – Item Carcaça 112
Quadro 9 - Resultado geral do Sistema no 1° Cenário 119
Quadro 10 - Resultado de Confiabilidade no 1º Cenário, Ranking da Confiabilidade. 120
Quadro 11 - Resultado geral do sistema no 2º Cenário 128
Quadro 12 - Resumos individuais, ranking da Confiabilidade 2º cenário 128
Quadro 13 - Comparativo dos resultados do Primeiro Cenário versus Segundo Cenário 134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo Médio entre Falhas de Bombas 35
Tabela 2 - Efeito da variação da vida do selo na vida da bomba..... 36
Tabela 3 - Vida da bomba em função da vida do selo 36
Tabela 4 - Tempos de vida recomendados para bombas e seus respectivos componentes 37
Tabela 5 - B.1 - Exemplo de Categorias de Frequência..... 152
Tabela 6 - B.2 - Exemplo de Categorias de Severidade..... 153
Tabela 7 - B.3 - Exemplo de Categorias de Detecção..... 154
Tabela 8 - B.4 - Exemplo de Categoria de Criticidade 154
Tabela 9 - B.5 - Exemplo de Matriz de Criticidade..... 155

LISTA DE PLANILHAS

Planilha 1 – FMEA da Bomba Centrífuga. 60
Planilha 2 - Resultado da FMEA da Bomba Centrífuga. 111

RESUMO

A necessidade da indústria do petróleo de produzir com o máximo de eficiência, sem esquecer os aspectos de segurança e meio ambiente, incentiva a otimização dos processos produtivos, faz com que se busque atingir um nível de excelência na aquisição de equipamentos, garantindo a qualidade sem prejuízo da segurança de instalações e de pessoas. Conhecer a confiabilidade de um equipamento e o que esta representa para um sistema é de fundamental importância à estratégia de produção quando se visa o máximo de retorno sobre o capital investido. As técnicas de análise de confiabilidade vêm sendo cada vez mais aplicadas na indústria como uma ferramenta estratégica para a predição da probabilidade de falhas e a garantia da integridade dos processos. Alguns fundamentos e teorias na área de confiabilidade embasam as decisões de se utilizar cálculos estocásticos na estimativa de falhas de equipamentos. Esta dissertação propõe o uso de duas técnicas capazes de associar aspectos qualitativos (através de informações coletadas no campo com a opinião de especialistas) e quantitativos (provenientes de bancos de dados de registros de falhas elaborados por empresas do segmento petrolífero do mar do norte Europeu, mais conhecidos como Oreda). Este trabalho trata do uso dessas duas técnicas aplicadas em uma bomba centrífuga, cujo sistema de injeção de água produzida ocorre em dois cenários possíveis de operação : com manutenção e sem manutenção. Os dados obtidos nas avaliações foram processados em software comercial de confiabilidade. Com o resultado desse hibridismo, foi possível determinar o ciclo de vida da Bomba Centrífuga e sua disponibilidade nesse período e qual será o impacto na produção caso este venha a falhar. O uso dessa técnica permitirá orientar qual a melhor política de manutenção – ferramenta importante para a tomada de decisões estratégicas na gestão do ativo.

Palavras-chave: Bomba Centrífuga. Confiabilidade. Manutenção.

ABSTRACT

RELIABILITY ANALYSIS OF A CENTRIFUGAL PUMP: WATER INJECTION SYSTEM FOR SECONDARY OIL RECOVERY

The oil industry`s need to produce with maximum efficiency, not to mention the safety and the environment aspects, encourages the optimization of processes. It makes them look for a level of excellence in acquisition of equipment, ensuring the quality without prejudice security of facilities and peoples. Knowing the reliability of equipment and that this stands for a system is fundamental to the production strategy to seeks the maximum return on investment. The reliability analysis techniques have been increasingly applied in the industry as strategy for predicting failures likelihood ensuring the integrity of processes. Some reliability theories underlie the decisions to use stochastic calculations to estimate equipment failure. This dissertation proposes two techniques associating qualitative (through expertise opinion) and quantitative data (European North Sea oil companies fault database, Ored) applied on centrifugal pump to water injection system for secondary oil recovery on two scenarios. The data were processed in reliability commercial software. As a result of hybridization, it was possible to determine the pump life cycle and what impact on production if it fails. The technique guides the best maintenance policy - important tool for strategic decisions on asset management.

Keywords: Centrifugal Pump; Reliability; Maintenance.

CAPÍTULO 1

Introdução

Capítulo 1

Neste capítulo encontra a descrição sobre o assunto tratado; a situação-problema; os fundamentos em que se basearam os estudos, o que justifica o uso de metodologias de confiabilidade e os objetivos a serem alcançados.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo e gás é importante ter-se alternativas para a elevação de petróleo e gás, e a injeção de água é um dos métodos mais utilizados. Para que este fenômeno ocorra, é necessário que a formação portadora de hidrocarbonetos, óleo ou gás esteja em contato direto com uma grande acumulação de água (aqüíferos), uma vez que a injeção de água no aqüífero é um método que garante cerca de 30 a 40% de recuperação de óleo originalmente existente (THOMAS, 2001).

Dentre as inúmeras estratégias de exploração de um determinado reservatório, a injeção de água é amplamente utilizada na indústria do petróleo como um método eficiente de reposição da energia primária do reservatório, pois, à medida que a produção avança, o aqüífero vai sendo dissipado e é de fundamental importância a sua reposição para que se obtenham maiores recuperações finais de petróleo. As principais razões para a larga utilização deste método de recuperação de óleo são: disponibilidade de água (água produzida); baixo custo operacional em relação à injeção de outros fluidos; facilidade operacional deste tipo de injeção; alta eficiência com que a água desloca o óleo; e também o fato desta tecnologia ser bem conhecida (THOMAS, 2001).

Convém analisar **dois cenários** possíveis da condição de funcionamento de uma bomba centrífuga: um cenário "**sem manuteção**" e outro cenário "**com manutenção corretiva**". No primeiro, se o equipamento quebrar haverá parada de produção recuperada somente após a troca da bomba. No segundo, com a falha do equipamento haverá reparo para retorno de produção. Estas duas condições são justificáveis sob o aspecto de custo e de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS).

O custo "com manuteção" incluindo toda logística pode ser superior ao custo de produção de óleo e gás, validando, assim, o uso da opção "sem manutenção". Por ser estratégico injetar água devido a uma necessidade de que se matenha a pressão no reservatório, o equipamento será usado até seu limite máximo, ou seja, até falhar.

Além disso, se o custo de produção fosse muito alto o tempo gasto com manutenção significaria perdas monetárias superiores a este dispêndio.

O fator SMS associado aos custos também justifica a decisão de não adotar manutenção ou de adotar pelo menos manutenção corretiva no equipamento, principalmente em determinadas situações de seguraça, a exemplo das plataformas auto operadas em campos de produção de difícil acesso como no pré-sal e das estações de injeção de água remotas onde exista a presença de gás sulfídrico (H_2S) ou risco de explosão.

Entretanto, os equipamentos utilizados para a injeção de água produzida possuem custos elevados. E a bomba centrífuga, seu componente principal, corresponde ao maior custo de todo um sistema de injeção de água. Justifica-se, dessa forma, a sua escolha como alvo de um estudo sobre sua confiabilidade. Levando-se em consideração todos os aspectos operacionais e de logística, na expectativa de que este equipamento cumpra a campanha para a qual foi projetado. Isto é, que tenha um ciclo de vida no mínimo igual ao tempo de operação do sistema de injeção de água produzida.

O passo inicial é determinar o ciclo de vida do equipamento. Conhecendo-se este ciclo, aplicando-se técnicas de manutenção baseadas na confiabilidade, é possível ter uma garantia do retorno ou até maximizar o capital investido. Para tanto, há a necessidade de selecionar técnicas que identifiquem aspectos fundamentais da vida útil do equipamento. Neste caso, foram escolhidas duas técnicas complementares: a *Failure Mode Effects Analysis* ou Análise e Efeitos dos Modos de Falhas (FMEA) e a *Failure Tree Analysis* ou Árvore de Falhas (FTA), que proporcionam uma visão sistêmica do processo e um conhecimento do funcionamento do sistema bomba. Estas foram selecionadas por serem técnicas consagradas e amplamente utilizadas pelos especialistas na área. Os dados probabilísticos originados de registros operacionais e fontes como *Offshore Reliabity Data* ou Dados de Confiabilidade da Produção no Mar (Oreda), foram tratados através de *software* específico, comercialmente conhecido. Utilizando o conceito estocástico, tal *software* permite calcular a confiabilidade do sistema, definindo os componentes que mais influenciam na confiabilidade do processo como um todo.

Estas informações podem indicar a direção para a adoção de ações preventivas e corretivas no projeto e na execução da manutenção; verificando componentes e subsistemas que devem receber atenção especial quando da montagem, fabricação ou

manutenção; orientando aos responsáveis pela gestão quanto a estrutura do sistema e os principais fatores que influenciam na sua confiabilidade para tomada de decisão. Em síntese: qual a capacidade de produção em função do equipamento e qual a sua previsibilidade de falhas durante o tempo estabelecido para o funcionamento do sistema de injeção de água.

1.1. OBJETIVO GERAL

Estimar, através de simulação, a confiabilidade de uma bomba centrifuga utilizada na injeção de água para recuperação de petróleo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar **FMEA** para a bomba investigada a partir da opinião e experiência de campo de especialistas do setor, demonstrando o uso dessa metodologia na avaliação qualitativa de vida do equipamento, identificando pontos críticos que possam ser melhorados para o aumento da confiabilidade e tomada de decisão dos gestores de ativos;
- Construir uma árvore funcional a partir dos resultados qualitativos da FMEA;
- Definir as funções de cada item da árvore funcional;
- Construir uma árvore de falhas a partir árvore funcional;
- Simular a configuração do **FTA** com os parâmetros de confiabilidade (utilizando-se o software comercial **BlockSim**) alimentados com dados do banco de dados **Oreda** para obtenção dos dados de confiabilidade, disponibilidade e mantenabilidade do equipamento;
- Elaborar quadro de resultados com dois cenários para facilitar a tomada de decisão (este quadro esta nos resultados na pagina 134).

CAPÍTULO 2

Contexto e Tecnologia na indústria do Petróleo

Capítulo 2

Este capítulo aborda o histórico da produção de petróleo e gás no RN, os métodos de recuperação de petróleo enfatizando o método secundário de injeção de água, os aspectos relacionados à bomba centrífuga para o sistema de injeção de água, os aspectos contextuais sobre confiabilidade, o uso do software BlockSim e a política de manutenção de equipamentos.

2. CONTEXTO E TECNOLOGIA NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

2.1 PRODUÇÃO EM TERRA NO RN

Em 1945, na cidade de Ouro Fino – MG, um potiguar começou a se interessar pela possibilidade da existência de petróleo em terras potiguares. Seu nome era: Jerônimo Vingt-Un Rosado Maia. Um jovem que, na época com 25 anos, dedicou-se a traduzir o trabalho "*Oil Possibilities in Brazil*", escrito em 1922, pelo geólogo norte-americano John Casper Branner (PETROBRAS, 2005).

Ele também conseguiu uma cópia de um artigo escrito em 1929, pelo geólogo Luciano Jaques de Morais. Neste trabalho, era apontada a possibilidade de petróleo em território potiguar. Nasceu ali, na Companhia de Escola de Engenharia de Ouro Preto, em 1945, a convicção de que no Rio Grande do Norte havia petróleo. A partir daquela época ele encampou uma batalha incessante para conseguir que o Estado fosse alvo de pesquisas para comprovar a existência de combustível (PETROBRAS, 2005).

Em 1947, Vingt-Un Rosado produziu seu primeiro trabalho em defesa do petróleo potiguar, publicado no jornal "O Mossoroense", nos dias 6 e 13 de abril daquele ano. Sob o título "Sobre Wildcat Mossoroense", o artigo divulgou uma lista de todos os trabalhos e pesquisadores relacionados ao assunto. Vingt-Un Rosado apresentou, pela primeira vez, ao público em geral os trabalhos do geólogo John Casper Branner e Luciano Jaques de Moraes, pesquisadores aos quais Paulo Fernandes não teve acesso quando falou sobre petróleo de forma pioneira (SILVA et al., 2002).

Em 1948, o então vereador Jerônimo Vingt-Un Rosado Maia, irmão mais velho de Vingt-Un Rosado, incentivou a Câmara Municipal de Mossoró a mandar um telegrama

para o CNP expressando a satisfação de saber que fora votada uma verba para perfuração de poços na Chapada do Apodi. Acrescentou que as sondas deveriam tanto buscar água quanto petróleo.

Um ano depois, a publicação "*Bulletins of American Association of Petroleum and Geologists*" (Boletim da Associação Americana de Petróleo e Geólogos), em seu 33º volume e edição de número 9, trouxe um mapa no qual o RN aparecia como uma das áreas com maior possibilidade de ocorrência de petróleo (PETROBRAS, 2005). O autor do trabalho foi Silvio Fróes de Abreu.

Em 1950, outro político resolveu fazer cobranças para que no território potiguar fosse pesquisada a possibilidade de petróleo. Utilizando o jornal "O Nacionalista" (cujo lema era "O petróleo é nosso") o então deputado estadual Floriano Bezerra de Araújo, reivindicou que a região de Macau fosse pesquisada. Em 1951, pesquisas foram feitas na região de Areia Branca e de Grossos. Em 1952, Luciano Jaques de Morais, voltou a participar da história do petróleo. Na região de Governador Dix-Sept Rosado, à margem do Rio Mossoró, no Poço de Pedra, ele descobriu foraminíferos - microrganismos indicadores da existência de petróleo. Ele tratou de indicar a descoberta à Academia Brasileira de Ciências. O geólogo ainda identificou esses mesmos sinais na região conhecida como Canto do Feliciano, em Mossoró, e na Baixa da Alegria, a seis quilômetros do Rio Upanema (PETROBRAS, 2005).

Em 1954, a recém-criada PETROBRAS enviou ao Rio Grande do Norte uma equipe sísmica, iniciando naquele ano a história da PETROBRAS em território Potiguar. No ano seguinte, mais precisamente no dia 1º de junho, o escritor Vingt-Un Rosado publicou no jornal "O Poti" o artigo "Uma refinaria para Mossoró" (PETROBRAS, 2005).

Em 1956, a Petrobras resolveu fazer a primeira sondagem no Rio Grande do Norte. O fato foi marcado por grande expectativa. Os defensores do petróleo potiguar davam como certo que as perfurações resultariam em uma abundante jazida do mineral (PETROBRAS, 2005).

A locação pioneira foi na região de Gangorra, no município de Grossos, próximo a Mossoró. Ela foi definida com base nos resultados dos estudos geológicos e geofísicos realizados na região sedimentar costeira do RN. No dia 9 de janeiro de 1956, a sondagem foi iniciada. A sonda contratada foi uma "*Oil Well*", com capacidade de

perfuração de três mil metros. No trabalho, a Petrobras verificou a existência de óleo. O resultado, contudo não foi animador (PETROBRAS, 2005).

O presidente da empresa Jurany Gentil Nunes, em carta ao presidente da república, na época Juscelino Kubitschek, explicou a situação:

> A diretoria da Petrobras acaba de receber comunicação de que a sondagem pioneira de Gangorra, localizada no município de Grossos, Rio Grande Norte, à profundidade compreendida entre 435 a 510 metros, intercalada no folheiro, encontrou uma formação arenítica com fraca impregnação de óleo (PETROBRAS, 2005).

A região de Macau, também verificada, da mesma maneira não apresentou resultados satisfatórios (PETROBRAS, 2005).

Em 1956, em meio a uma grande decepção, foi encerrado um capítulo da história que, apesar dos sinais, ainda seria favorável a pessoas como padre Florêncio Gomes de Oliveira e tantos outros que acreditavam na existência de Petróleo na bacia Potiguar. Nos anos seguintes (1957, 1958 e 1959), Vingt-Un Rosado escreveu que mesmo com o fracasso as esperanças não deveriam ser deixadas de lado.

No ano de 1960 surgiu um novo geólogo em defesa do petróleo na bacia potiguar: Antônio Natércio de Almeida. Em seu trabalho "Duas áreas na região de Mossoró de interesse para pesquisa de petróleo", ele indicou outras duas áreas no RN que deveriam ser investigadas: entre o baixo Jaguaribe e Mossoró-Apodi, e o Piranhas-Açu (PETROBRAS, 2005).

Somente 40 anos depois veio à tona que o estudo de Antônio Natércio de Almeida era realmente sério. Na realidade, o nome era o pseudônimo do geólogo Aziz Nacib A'saber. O próprio, num artigo publicado na edição de dezembro de 2003 da revista *Scientific American Brazil*, fez questão de contar como o "respeitado geólogo" Antônio Natércio de Almeida nasceu. A criação não poderia ter saído da cabeça de outro escritor: Vingt-Un Rosado (PETROBRAS, 2005).

A despeito de artigo escrito por Aziz, com pseudônimo de Antônio Nartécio, intitulado "Caminhos travessos na descoberta do petróleo (Bacia Potiguar)", a

PETROBRAS respondeu que não poderia votar a pesquisar na bacia potiguar do RN porque agora seu interesse estava voltado para Amazônia (PETROBRAS, 2005).

Uma profecia na quinta-feira santa daquele ano se tornou marca dessa história "Um dia torres (sonda) voltarão ao sagrado chão de Mossoró e dirão muito alto que John Casper Branner (o sábio de Stanford) e Luciano Jaques de Morais (o grande geólogo patrício) estavam certos absolutamente, quando há 43 e 39 anos, respectivamente, falaram do petróleo Mossoroense" (PETROBRAS, 2005).

Ainda naquele ano, a Petrobras enviou uma equipe de geólogos de terra para estudar a bacia potiguar. A partir do envio dessa equipe, o rumo da história do petróleo potiguar começou a mudar. Em 1966, firmas como a CASOL e órgãos como Conesp, financiadas pela CAERN perfuraram poços na região que não resultaram só em água (PETROBRAS, 2005).

No início da segunda metade da década de 1970, o então governador Tarcísio Maia idealizou a construção de um hotel em Mossoró (PETROBRAS, 2005). A primeira providência para concretizar esse plano foi perfurar um poço profundo para fornecer água quente para o banho dos turistas. A CDM iniciou a perfuração em 10 de março de 1977, e em 30 de abril do mesmo ano concluiu a perfuração. A profundidade atingida foi em torno de 895 metros. Para evitar problemas de contaminação (óleo), o diretor da CDM, o geólogo Francisco de Assis Câmera Ferreira de Melo, determinou que fosse feita uma cimentação na profundidade entre 650 a 750 metros. Depois disso, o poço foi tamponado e ficou aguardando o dia para ser reaberto para encher as piscinas (PETROBRAS, 2005).

Já no mandato do então governador Lavoisier Maia, na primeira tentativa de encher as piscinas, o óleo insistiu em aparecer, deixando a água coberta por uma "nata negra". O problema ficou a cargo da CPRM, que contratou a ***Dowell Schlumberger***, que radiografou o poço e constatou que a contaminação foi causada por fissuras provocadas por gases e a solução foi fazer nova cimentação e colocar outro tipo de tampão que garantisse a integridade da água (PETROBRAS, 2005).

A Petrobras foi novamente acionada e o então diretor de exploração da Petrobras Carlos Walter Marinho disse: "Estar autorizada a perfuração"

Na ocasião foram perfurados dois poços: o MOS-13 para fornecimento d'água e comprovação de testes, e o MOS-14 para a produção de óleo e no dia 27 de dezembro

de 1979 foram produzidos 27 mil litros, os primeiros em solo mossoroense, e foram destinados para uma fábrica de asfalto em Fortaleza-CE (PETROBRAS, 2005). Após a perfuração do poço MOS-14, a Petrobras intensificou os trabalhos no Rio Grande do Norte, e já em março de 1980 entra em operação o segundo poço. A partir daí vieram outras descobertas, e seis anos depois entra em produção o campo de petróleo do Canto do Amaro, hoje o maior campo de produção terrestre do País.

2.2 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO

Os reservatórios que retêm quantidade de hidrocarbonetos após a exaustão da sua energia natural necessitam do emprego de uma série de processos que visam à sua recuperação adicional. Estes processos são chamados de métodos de recuperação que, de maneira geral, tentam interferir nas características do reservatório que favorecem a retenção exagerada do óleo (THOMAS, 2001).

Os métodos de recuperação foram desenvolvidos para se obter uma maior produção do que aquela que se obteria, caso apenas a energia natural do reservatório fosse utilizada.

Baseadas na idéia de que as baixas recuperações eram resultado das baixas pressões no reservatório, as primeiras experiências buscavam fornecer pressões ao reservatório por meio da injeção de um fluido cuja finalidade era deslocar o fluido residente no meio poroso e ocupar os espaços deixados por estes (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006). Uma vez que nem sempre o aspecto mais crítico do fluxo dos fluidos no meio poroso é a baixa pressão, a simples injeção de fluidos para deslocar outros fluidos nem sempre resultava em sucesso. Como resultado da observação e da análise dos comportamentos dos meios porosos quando sujeitos à injeção de fluidos, surgiram os diversos processos conhecidos atualmente.

A vida produtiva de um reservatório de petróleo, particularmente quando aplicados métodos de recuperação, é composta pelo que cronologicamente se chama de recuperação primária, recuperação secundária, recuperação terciária e etc.

A recuperação primária é a produção resultante da atuação da energia natural do reservatório. A um segundo esforço deu-se o nome de recuperação secundária; a um terceiro de terciária; e assim por diante. Com o passar do tempo, as expressões secundárias e terciárias perderam sua conotação cronológica e passaram a designar a natureza do processo. Assim, a recuperação secundária passou significar injeção d'água

ou injeção de gás, e recuperação terciária passou designar os demais processos (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006).

No caso de injeção d'água ou injeção de gás, os processos consagrados tecnologicamente são chamados de Métodos Convencionais de Recuperação. Processos mais complexos, cujas tecnologias ainda não estão satisfatoriamente desenvolvidas, são chamados de Métodos Especiais de Recuperação (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006).

2.2.1 Métodos convencionais de recuperação

Ao se injetar um fluido em um reservatório com a finalidade única de deslocar o óleo para fora dos poros da rocha, buscando-se uma ação puramente mecânica, tem-se um processo classificado como Processo Convencional de Recuperação.

Esta ação mecânica, sem qualquer interação de natureza química ou termodinâmica entre os fluidos ou entre o fluido e a rocha é o que se espera quando se injeta água ou se submete o reservatório a um processo não miscível de injeção de gás. Em outras palavras, não se espera que os fluidos se misturem entre si ou interfiram na rocha-reservatório (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

O fluido injetado que também recebe o nome de fluido deslocante, deve empurrar o óleo, também chamado de fluido deslocado, para fora dos poros da rocha e, ao mesmo tempo, ir ocupando o espaço deixado à medida que o óleo vai sendo expulso. Mesmo na porção do reservatório invadida pelo fluido deslocante (água, por exemplo) nem todo óleo é deslocado. O óleo retido nos poros da zona invadida pela água, denominado óleo residual, é efeito da capilaridade (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

Costuma-se classificar como Recuperação Convencional, além da obtida com os processos de injeção mencionados, a recuperação devido a energia primária do reservatório.

2.2.2 Projeto de injeção de água produzida

Uma etapa de grande importância no projeto de injeção é a definição do esquema de injeção, isto é, a maneira como os postos de injeção e de produção serão

distribuídos no campo de petróleo, existindo uma grande diversidade no modo de executar a injeção de um fluido (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

Além de levar em conta as características do meio poroso e dos fluidos envolvidos, o modelo escolhido deve:

- Produzir a maior quantidade de óleo possível dentro de um tempo economicamente viável e com menor quantidade de fluido injetado;
- Oferecer boas condições de injetividade para se obter boa produtividade;
- Efetuar a escolha evitando-se os poços novos, se possível.

Cada projeto é exclusivo para cada reservatório. Entretanto, existem aspectos que são comuns a todos os projetos, independentemente dos reservatórios ou até mesmo do fluido injetado. Os projetos devem especificar aspectos como quantidade e distribuição dos poços de injeção e de produção, pressão e vazões de injeção, estimativas das vazões de produção e volumes de fluidos a serem injetados e produzidos. Estes dados, além de serem necessários para o dimensionamento dos equipamentos são fundamentais para a viabilidade econômica do projeto (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

O esquema de injeção divide-se em três tipos principais: injeção na base; injeção no topo e em injeção em malhas (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

Para reservatórios planos, horizontais e de pouca espessura, pelo fato de não existirem pontos preferenciais para injeção dos fluidos, os poços de injeção e de produção são distribuídos de maneira homogênea em todo o reservatório (Figura 1).

Nesse tipo de esquema verifica-se que ocorre a repetição de um determinado padrão ou arranjo dos poços de injeção e produção, razão pela qual é chamado de padrão repetido ou injeção em malhas (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

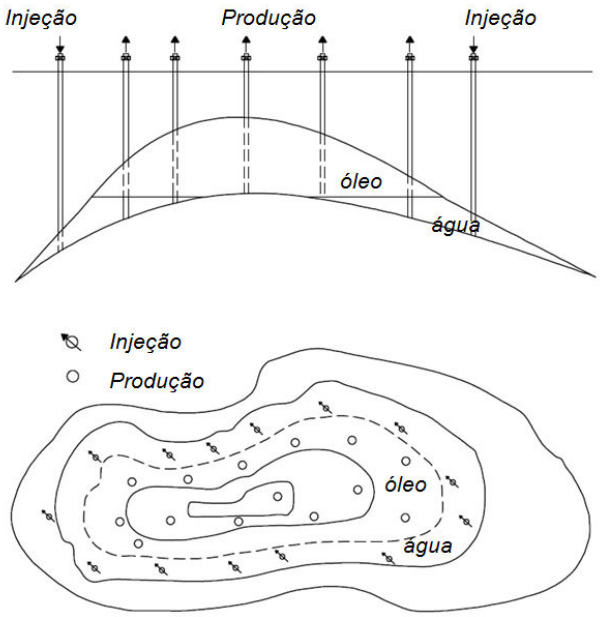


Figura 1 - Poços de injeção e de produção distribuídos de maneira homogênea em todo o reservatório.

Fonte: Engenharia de Reservatório de Petróleo, Interciência, Rio de Janeiro-2006

2.2.2.1 Fluido Injetado

Os processos convencionais de recuperação utilizam água e gás natural como fluidos de injeção. A água de injeção pode ter quatro origens diferentes (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001):

- Água subterrânea, coletada em mananciais de subsuperfícies por meio de poços perfurados para este fim;
- Água de superfícies coletada em lagos;
- Água do mar;
- Água produzida, isto é, a água que vem associada à produção de petróleo.

Normalmente, a água, antes de ser injetada, deve ser submetida a um tratamento, de modo a torná-la mais adequada ao reservatório e ao fluido nele existente.

2.2.3 Sistema de Injeção de Água Produzida

Após a caracterização do reservatório, determinam-se as características ideais da água a ser injetada e, com estes dados, projeta-se o sistema de injeção que, de maneira geral, é composto das seguintes partes:

- Subsistema de captação de água, tais como poços (uso de água subterrânea) ou conjunto de bombas (uso de água da superfície ou água do mar);
- Subsistema de adução;
- Tancagem;
- Sistemas de injeção;
- Subsistema de tratamento d'água de injeção;
- Subsistema de água, propriamente dito, que é composto de bombas, linhas e poços de injeção.

2.2.3.1 Aspectos Operacionais da Injeção de Água

A depender do estágio em que se encontra o reservatório, pode-se optar pela repressurização ou apenas pela manutenção da pressão do reservatório, injetando-se com uma vazão maior ou igual à vazão de produção dos fluidos. Ao se injetar água em um reservatório, eleva-se a saturação da água à altura do poço injetor, formando-se um bloco de óleo à frente da água injetada. Entre a zona lavada e o banco de óleo tem-se uma zona onde a saturação da água cai bruscamente, denominada de frente de avanço. Quando o banco de óleo alcança o poço de produção verifica-se um aumento brusco da produção de óleo (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

O período de tempo entre o início das operações e a chegada do óleo do poço produtor é chamado de tempo de enchimento (*fill up*) (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

Quando a frente de avanço atinge o poço produtor, aumentando bruscamente a RAO, ocorre então o que se chama de erupção (*breakthough*). Após a erupção, a Razão Água/Óleo (RAO) continua a crescer até atingir níveis que irão inviabilizar economicamente a produção do poço, sendo este fechado e transformado em poço injetor (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; THOMAS, 2001).

2.3 MOTOBOMBAS CENTRÍFUGAS

Motobombas centrífugas são utilizadas como principal meio de injeção de água produzida por serem equipamentos simples, econômicos, recomendados por normas internacionais e eficientes do Instituto do Petróleo Americano (API 610), dentre outros tipos de bombas disponíveis para a elevação da pressão do fluido a ser injetado no reservatório.

As classificações geral e detalhada das bombas podem ser representadas na figuras 2 e 3, respectivamente.

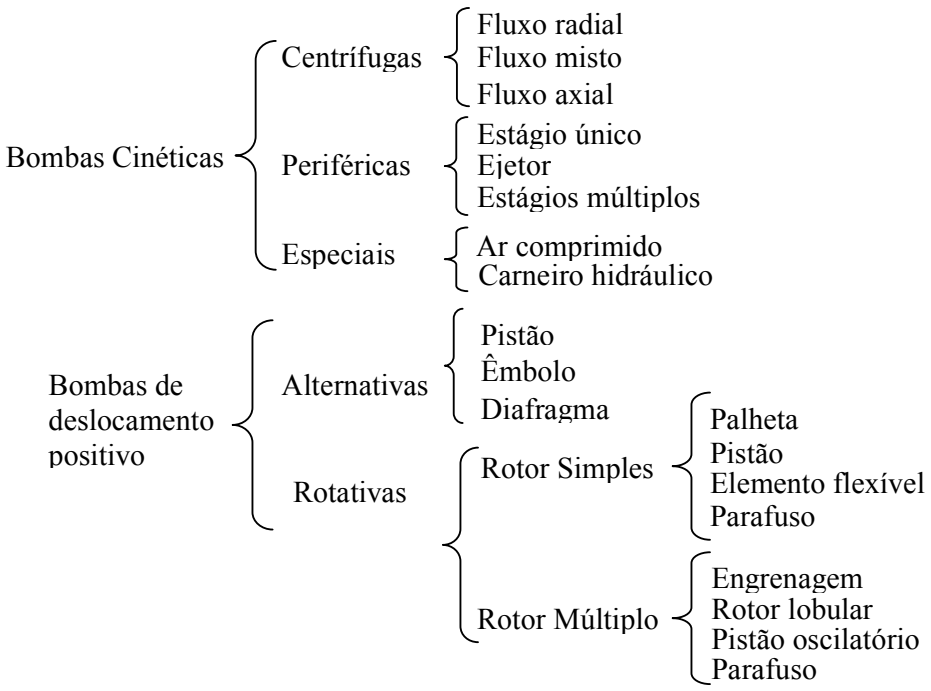


Figura 2 - Classificação Geral das Bombas

Fonte: TSUTIYA, 2004

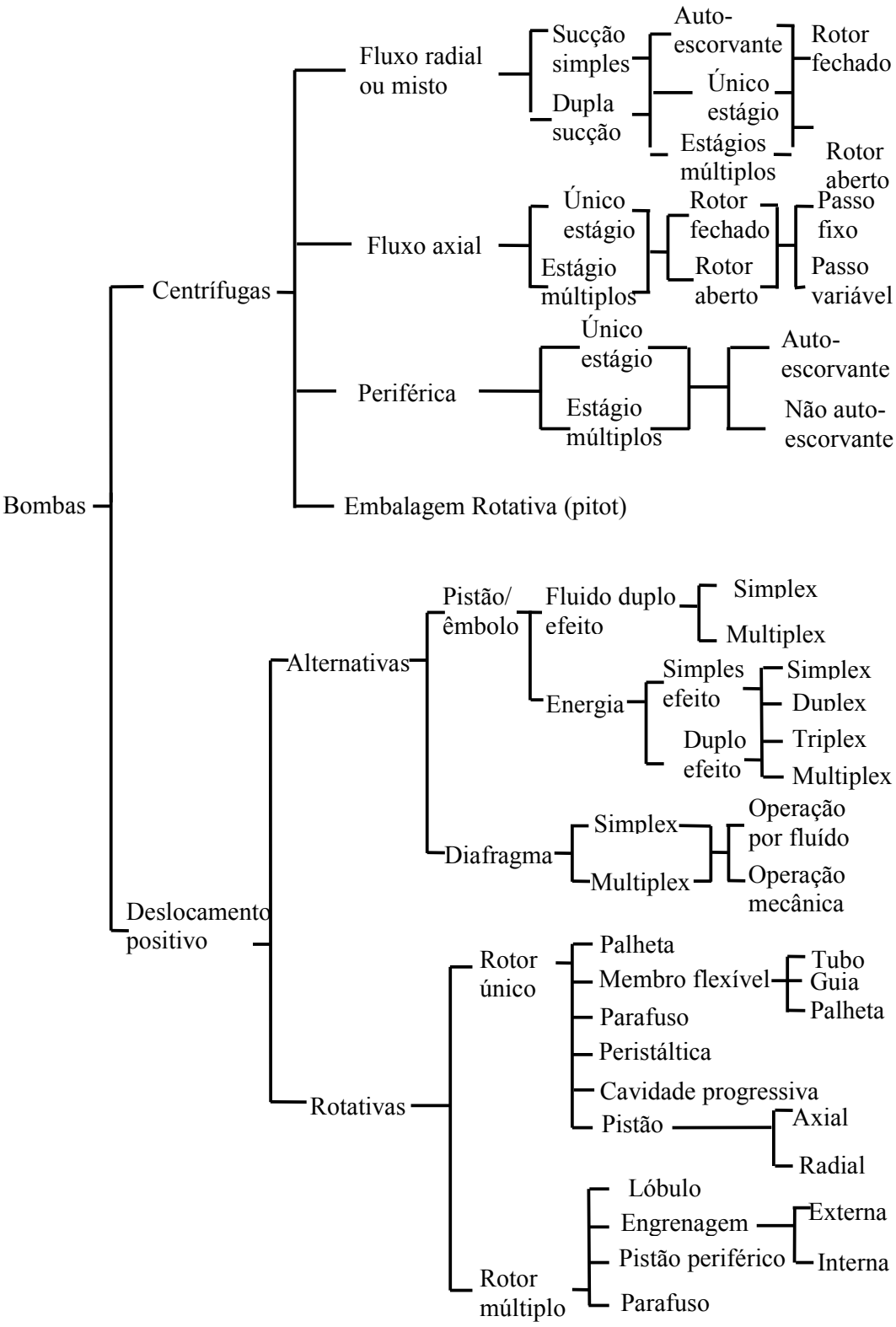


Figura 3 - Classificação detalhada das bombas

Fonte: EUROPUMP, HYDRAULIC INSTITUTE, 2004

2.3.1 Norma API

A norma API 610 estabelece os requisitos mínimos para as bombas centrífugas no que diz respeito ao projeto básico dos componentes mecânicos, acessórios, testes e parâmetros de aceitação.

2.3.2 Monitoração

Os aspectos que devem ser monitorados para preservação e manutenção da confiabilidade de um conjunto motor/bomba são: temperatura, vibração, ruídos e lubrificação.

A temperatura pode ser monitorada, estabelecendo parâmetros críticos e de *shut off* do sistema via sensores ligados diretamente a uma central *on line* ou através de rondas detectivas pelos operadores. Especial atenção deve ser dada ao sistema de refrigeração de selos (JUNIOR, 2004; LIMA, 2003; MATTOS; FALCO, 1998; SILVA et al., 2002).

Deve-se adotar a boa prática de verificação dos níveis vibracionais de pontos posicionados nos mancais ou próximo deles, a fim de monitorar o comportamento de elementos (mancais, rolamentos, eixos, e etc.) cuja sua falha provoque quebra do equipamento e paralisação do sistema (JUNIOR, 2004; LIMA, 2003; MATTOS; FALCO, 1998; SILVA et al., 2002).

Os ruídos podem ser de várias fontes, como da própria vibração, do funcionamento turbulento e cavitação. Estes, assim como a temperatura, podem ser monitorados via rondas detectivas pela operação (JUNIOR, 2004; LIMA, 2003; MATTOS; FALCO, 1998; SILVA et al., 2002).

Existem vários esquemas de lubrificação de bombas hidráulicas, deve-se ter maior atenção para o monitoramento e análise ferrográfica do óleo lubrificante (JUNIOR, 2004; LIMA, 2003; MATTOS; FALCO, 1998; SILVA et al., 2002).

2.3.3 Operação

O procedimento de operação de sistema motor bomba centrífuga é geralmente determinado através de procedimentos elaborados pela engenharia de processo, operação e manutenção e pelos manuais dos fabricantes. Os principais cuidados com as

condições de operação são: fluxo reduzido; escorva; partida e parada de bombas; e funcionamento.

2.3.3.1 Operação com fluxo reduzido

O aumento da temperatura é o cuidado principal, no caso em que seja necessário operar com capacidades e altura manométricas, que diferem consideravelmente das condições nominais, aumentando assim a temperatura da bomba. Além disso, deve ser observado que se a bomba estiver trabalhando com uma válvula completamente fechada, a perda da potência será a potência desenvolvida na vazão nula (*shut off*), aumentando, assim, a temperatura da bomba (LIMA, 2003).

2.3.3.2 Escorva

As bombas que conduzem o fluido inferior ao seu local de sucção devem ser escorvadas, processo no qual é retirado o ar ou gás do sistema e substituído pelo líquido a ser comprimido.

2.3.3.3 Partidas e paradas

As etapas de procedimentos de partidas e paradas de uma bomba centrífuga são também em função do tipo da bomba e do sistema sendo determinado pela engenharia e manuais de fabricantes, obedecendo a uma ordem lógica e comum (LIMA, 2003). Ver Figura 4.

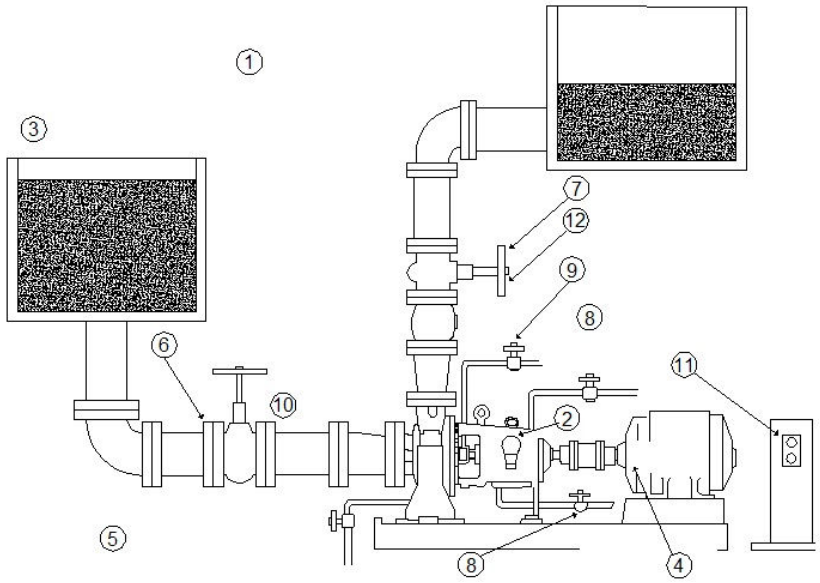


Figura 4 - Partida de uma Motobomba

Fonte: LIMA, 2003

Legenda:

1 - Verificar condições de segurança;

2 - Verificar nível de óleo;

3 - Verificar nível de líquido no reservatório de sucção;

4 - Verificar sentido de rotação do acionador;

5 - Fechar válvula de dreno;

6 - Abrir válvula de sucção;

7 - Fechar válvula de descarga;

8 - Abrir válvula de água de resfriamento;

9 - Abrir válvula de líquido de selagem;

10 – Verificar escorva;

11 - Ligar a chave do motor;

12 - Abrir válvula de descarga;

2.3.3.4 Funcionamento de um Bomba Centrífuga de Múltiplos estágios

Os rotores elevam a energia e a velocidade do líquido. A água sai com energia pelo processo de compressão da bomba. A energia de velocidade se transforma dentro dos difusores, parte em energia de pressão. As aletas de condução de retorno dispostas nas paredes dos difusores, no mesmo lado da pressão, conduzem a corrente de impulsão, de uma maneira hidraulicamente favorável a entrada do próximo rotor. Este processo se repete de estágio em estágio, aumentando a pressão em cada estágio.

Saindo do difusor do último estágio, a água passa para o corpo de pressão e, conseqüentemente, para tubulação de recalque conectada a bomba. Uma pequena parte da vazão de trabalho denominada de líquido de equilíbrio vem desde o último rotor e se instala diante do disco de equilíbrio. A pressão diante do referido disco passa pelo contradisco de equilíbrio formando-se, entre ambos, uma película de água. Esta região é denominada câmara de equilíbrio, e o líquido de equilíbrio é conduzido para o flange de sucção da bomba ou para o tanque de sucção. O dispositivo de equilíbrio serve para compensar o empuxo axial que atua em direção ao lado da sucção.

O sucesso da operação é conseguido mediante a disposição de uma folga variável entre o disco de equilíbrio e o contra disco, seguido de uma folga constante no trajeto de estrangulação da forma cilíndrica. Este processo regula-se automaticamente. Se a folga for demasiado pequena no disco de equilíbrio, aumentará a pressão que atua sobre o mesmo, devido ao aumento da estrangulação. Como efeito resultante, o referido disco se "abrirá".

Quando, pelo contrário, a folga é demasiadamente grande, será produzido o aumento do líquido de equilíbrio através da folga de estrangulação. Uma acumulação desse líquido de equilíbrio proporciona um acréscimo da pressão atrás do disco, que traz consigo um estrangulamento da folga, ou seja, o disco de equilíbrio tende a diminuir esta folga.

A linha de saída do líquido de equilíbrio não deve produzir nenhuma restrição a contrapressão, o que ocasiona um desnivelamento do equilibro e do empuxo. O funcionamento perfeito do diapositivo de compensação permanecerá plenamente assegurado e garantirá a livre saída da água de compensação.

2.3.3.5 Ponto de operação

O ponto de operação ou ponto de trabalho de uma bomba centrífuga é o ponto de interseção da curva(Anexo B, p. 156) da altura manométrica da bomba com a curva característica do sistema. A Figura 5 apresenta a análise do afastamento do ponto de operação de bombas centrífugas em relação ao Ponto de Melhor Eficiência (BEP). (Este ponto define a vazão de operação, a altura manométrica, a eficiência e a potência consumida pela bomba.

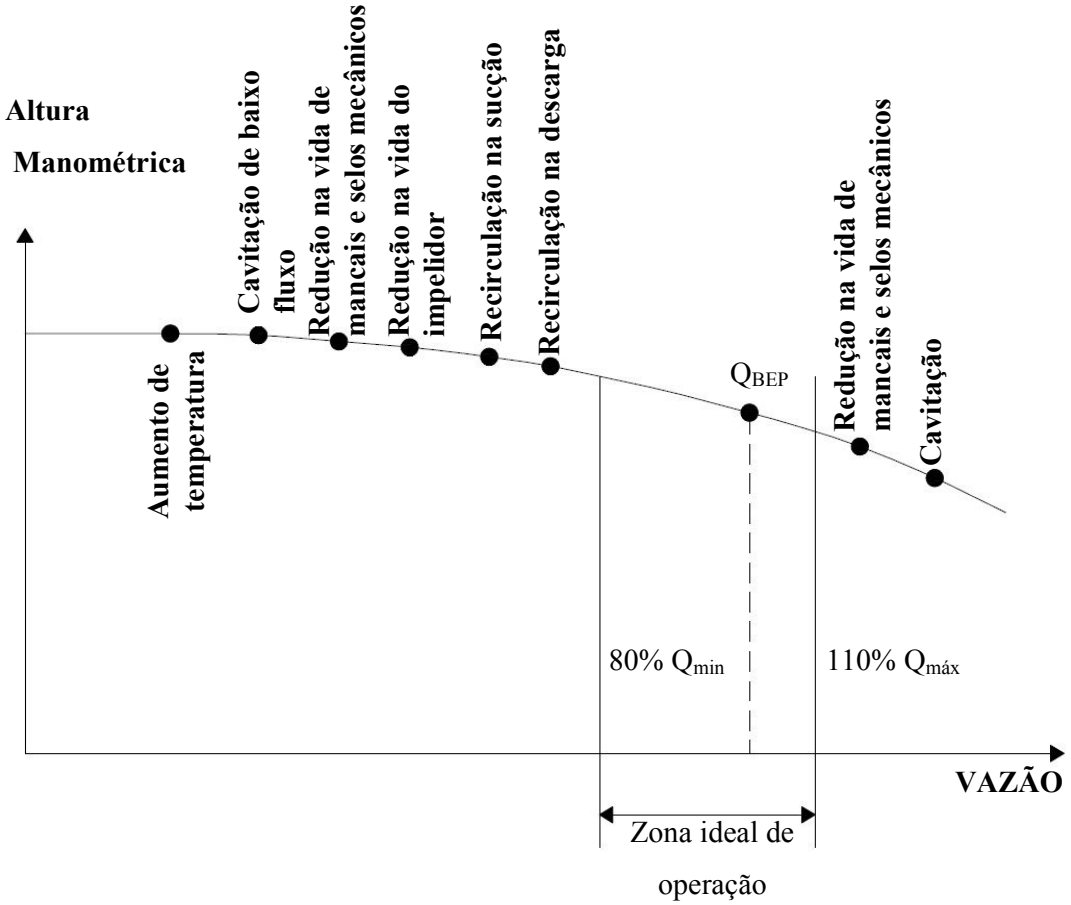


Figura 5 - Ponto de melhor eficiência, BEP.

Fonte: LIMA, 2003

2.3.3.6 Controles operacionais

Segundo Pio Correia de Lima (2003), podem ser feitas alterações temporárias conforme o Quadro 1 a seguir mostrando o que acontece com a vazão e a pressão de descarga da bomba quando se executa uma operação na mesma. Trata-se de quadro auto-explicativo acerca do entendimento do efeito da manobra sobre o que acontece com eficiência da bomba.

Variações das condições operacionais em Bombas Centrífugas				
Local da manobra	**Tipo de Operação**	**Efeito provocado na**		**Observações**
		Pressão de descarga	**Vazão**	
Na válvula na linha de descarga	Abertura da válvula	Diminui	Aumenta	
	Fechamento da válvula	Aumenta	Diminui	Não operar a bomba com vazão menor que 20% da vazão do ponto de melhor eficiência
No acionador	Aumento da velocidade	Aumenta	Aumenta	
	Redução da velocidade	Diminui	Diminui	Não operar a bomba com vazão menor que 20% da vazão do ponto de melhor eficiência

Quadro 1 - Manobras Operacionais.

Fonte: LIMA, 2003

2.4 CONFIABILIDADE

Desde a década de 1960, a análise probabilística de riscos tem sido desenvolvida e aplicada nos mais diversos ramos industriais, sendo impulsionada, em meados da década de 1970, pela publicação do relatório Wash 1400 (NRC, 1975) (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

As indústrias aeronáuticas e nucleares foram as propulsoras do avanço da análise probabilística de riscos. Na década de 1980, a indústria militar detinha a maior parte de tecnologia de componentes eletrônicos e mecânicos. Naquela época, apresentar uma alta confiabilidade era de vital importância, além disso, o custo era fator determinante em projetos. Passada a "guerra fria", o volume de produção militar diminuiu. Hoje em dia a tecnologia de equipamentos é desenvolvida tendo como foco a demanda do consumidor (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

Todas as definições especificam a confiabilidade como uma probabilidade, portanto trata-se de uma grandeza estatística. Além disso, todas elas pressupõem que o equipamento tenha um desempenho específico sob condições e período de utilização predefinidos (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

Destacam-se também alguns aspectos importantes a serem avaliados em uma análise de confiabilidade.

A função do equipamento deve ser claramente definida. Também é importante avaliar o meio físico que envolve o equipamento, assim como os recursos de instalação, manutenção e a interface com o usuário. Finalmente, é fundamental para uma análise de confiabilidade a determinação do período de utilização do equipamento. Este período nem sempre é medido como uma grandeza temporal, mas pode ser medido como uma distância percorrida ou, ainda, através de ciclos de operação (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

Outra forma de conceituar confiabilidade é: "a probabilidade de que um sistema ou equipamento sobreviva por um período de tempo específico" (MOUBRAY, 2000).

Expressando esta conceituação em termos da variável aleatória, o tempo até ocorrer a falha, e da correspondente função densidade de probabilodade (fdp) de ocorrência de falha f(t), tem-se que a probabilidade de falha, em um intervalo de tempo

específico T, pode ser definida pela relação (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000):

$$\mathbf{f}(t)\ \Delta t = \mathbf{P}\ \{\ t\ < T < \Delta t + \ t\ \} \qquad \text{(Equação 2.1)}$$

Sendo F(***t***) a função de probabilidade acumulada, vem:

$$\mathbf{F}\ (t) = \mathbf{P}\ \{\ \mathbf{T} < t\ \} \qquad \text{(Equação 2.2)}$$

Ou seja, F(*t*) expressa a probabilidade de ocorrer falha até um tempo *t*. Esta função f(*t*) é crescente com o tempo, atingindo um valor unitário quando *t* tende ao ∞, tal como indicado na Figura 6.

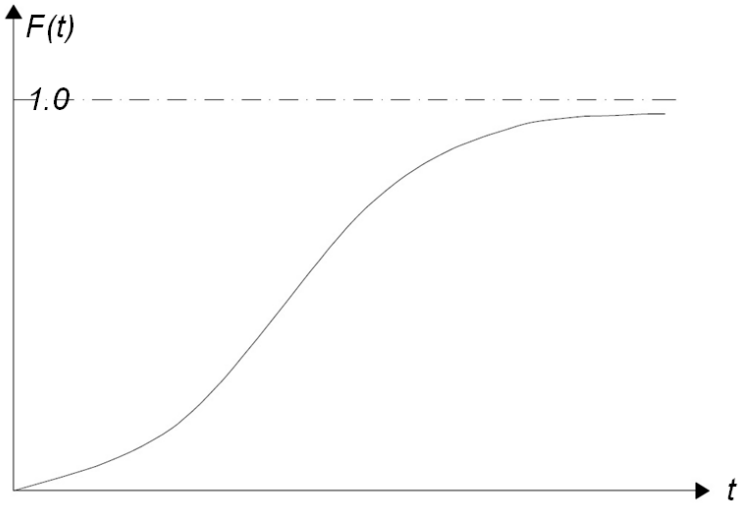


Figura 6 - Função de Probabilidade Acumulada F(t).
Fonte: LEITCH, 1995

Sob o ponto de vista da lógica, um componente/equipamento está operando adequadamente, conforme o previsto no projeto, ou encontra-se no estado de falha. Eventos estes mutuamente excludentes. Logo, a confiabilidade pode ser probabilisticamente expressa pela relação:

$$\mathbf{R}\ (t) = \mathbf{P}\ \{\mathbf{T} > t\}, \qquad \text{(Equação 2.3)}$$

Ou seja,

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{1} - \mathbf{F}(t) \qquad \text{(Equação 2.4)}$$

A Função de Confiabilidade R(t) está mostrada na Figura 7.

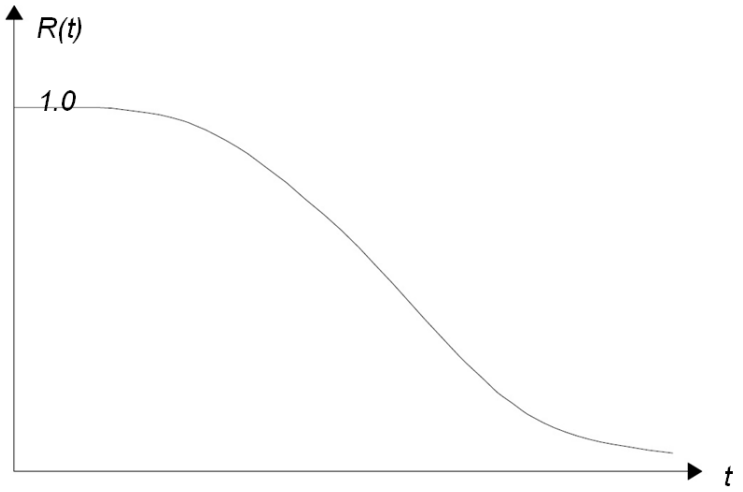


Figura 7 - Função de Confiabilidade R(t).
Fonte: LEITCH, 1995

Em decorrência da própria definição da função distribuição acumulada, tem-se:

$$\mathbf{R}(t = 0) = \mathbf{1} \qquad \text{(Equação 2.5)}$$

$$\mathbf{R}(t = \infty) = \mathbf{0} \qquad \text{(Equação 2.6)}$$

A partir do gráfico apresentado na Figura 7, verifica-se que a confiabilidade de um produto ou sistema apenas decai ao longo do tempo, ou seja, quanto maior o tempo de operação do mesmo, maior será a probabilidade deste apresentar falha. Apenas no instante em que o equipamento é colocado em operação sua confiabilidade é de 100%. Adicionalmente, pode-se afirmar que a confiabilidade não é restaurada, ou seja, não dá "saltos" ao longo da vida operacional (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

O comportamento de determinado produto com relação a falha é mais bem compreendido pelo exame do comportamento de sua taxa de falha.

Esta taxa de falha $\lambda(t)$ pode ser definida em termos da própria confiabilidade, como segue: "Sendo $\lambda(t).\Delta t$ a probabilidade de que o sistema falhará em um tempo $T < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou até o tempo em $T = t$", tem-se que $\lambda(t).\Delta t$ é a probabilidade condicional abaixo indicada (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

$$\boldsymbol{\lambda(t) = P\,(T < t + \Delta t \mid t > t)} \qquad \text{(Equação 2.7)}$$

Assim, com base na definição de probabilidade condicional, tem-se:

$$\boldsymbol{P\,(T < t + \Delta t \mid T > t) = P\,\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\} / P\,(T > t)} \qquad \text{(Equação 2.8)}$$

Como o numerador da Equação (2.8) é a própria $f(t).\Delta t$ e o denominador é a $R(t)$, a taxa de falhas instantânea é expressa pela relação:

$$\boldsymbol{\lambda(t) = f\,(t) / R(t)} \qquad \text{(Equação 2.9)}$$

Sendo $f(t)$ função densidade de probabilidade de falha e $R(t)$ a confiabilidade.

O comportamento da taxa de falha $\lambda(t)$ em relação ao tempo t é um indicador das causas de falha. A curva da banheira (*bathtub curve*), mostrada na Figura 8, representa graficamente esta relação para sistemas ou componentes, sem redundância (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

Relativamente curto, o intervalo de tempo indicado na região I do gráfico apresentado na Figura 8, indica taxas de falha que decrescem a partir de t=0.

Essa região denomina-se de falhas precoces (*early failures*) ou ainda, em analogia com seres humanos, de mortalidade infantil. Sob este parâmetro de comparação neste período, as mortes são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas, sendo que a taxa de mortalidade decresce com o tempo. Muitas vezes o problema da falha precoce é contornado através da especificação de um período de tempo durante o

qual o equipamento realiza um pré-teste (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000). Durante este tempo, o carregamento e utilização do produto são controlados de tal maneira que os problemas são detectados e reparados. Normalmente, as falhas precoces ou prematuras estão relacionadas a problemas associados aos processos de fabricação e montagem, ou mesmo ao material empregado na fabricação do componente. Estes problemas não são usuais. Ocorrem esporadicamente por alguma razão não específica. No caso de montagem, é bastante comum a falha estar relacionada a algum erro humano do montador.

A região intermediária da curva da banheira, aproximadamente constante, apresenta as menores taxas de falha, sendo preferencialmente o período de operação do sistema. As falhas que ocorrem durante esta fase são denominadas falhas aleatórias e normalmente originam-se de carregamentos inevitáveis e inesperados e menos comumente devido a defeitos inerentes ao equipamento em si. Fazendo-se uma analogia com a população humana, as mortes nesta parte da curva da banheira ocorrem devido a acidentes. Nos equipamentos podem-se citar como exemplos de causas de falha na região II: surtos de energia, vibrações, impactos mecânicos, flutuações de temperatura e de umidade, etc.

Na região III, à direita da curva da banheira, observa-se que a taxa de falha é crescente, em função do próprio desgaste do equipamento. Esta parte final do gráfico que representa o final de sua vida útil e o início do desgaste é também conhecida como "envelhecimento". A partir daí, as falhas tendem a ter natureza cumulativa, tais como corrosão, trincas por fadiga, desgaste por atrito, dentre outras. O aumento muito rápido da taxa de falha normalmente fundamenta o critério de quando as peças devem ser substituídas e também determina a vida útil do produto ou sistema.

A curva da banheira pode ser considerada genérica, uma vez que cada categoria de equipamento apresenta uma curva característica. Para equipamentos eletroeletrônicos, por exemplo, a curva da banheira apresenta, tipicamente, as regiões I e II, ou seja, verifica-se a presença da falha precoce e, durante a vida operacional, os mesmos apresentam falhas de natureza aleatória, sem as características de envelhecimento. Contrariamente, para componentes mecânicos, pode-se afirmar que a curva da variação temporal da taxa de falha apresenta preferencialmente as regiões I e

III (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

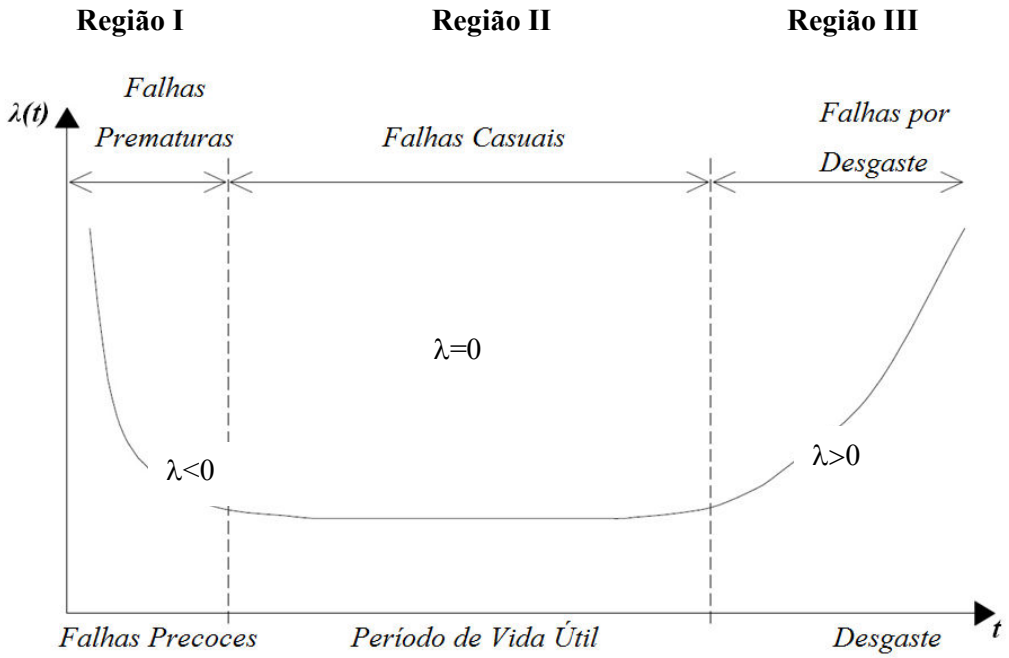


Figura 8 - Representação da Curva da Banheira.
Fonte: MOUBRAY, 2000

Nestes casos, a falha inicial está associada a problemas de fabricação, montagem ou de materiais, que induzem à falha no início da vida operacional. Com o uso, os equipamentos mecânicos falham por desgaste, corrosão ou fadiga, cumulativos ao longo do tempo de operação, até que se atinja um valor crítico, precipitando a falha. Desse modo, a probabilidade de falha do equipamento é crescente ao longo do tempo, aumentando a taxa de falha, representando um envelhecimento ou desgaste do produto (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000).

Um parâmetro importante de qualquer distribuição estatística é o seu valor médio. O valor médio associado a uma função densidade de probabilidade f(x) é

calculado como (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000):

$$\boldsymbol{\mu = \int_0^{\infty} x\, f(x)\, dx} \qquad \text{(Equação 2.10)}$$

Quando são medidos os tempos até a falha de componentes ou sistemas e são calculadas as funções f(t) ou F(t), está se trabalhando com distribuições estatísticas de tempo de vida. Quando essa distribuição é de tempo até a falha, o valor médio é chamado de Tempo médio até a falha **(MTTF, do inglês *Mean Time to Failure*).** Pode ser calculado por:

$$\textbf{MTTF} = \boldsymbol{\mu = \int_0^{\infty} t\, f(t)\, dt} \qquad \text{(Equação 2.11)}$$

2.4.1 Confiabilidade de sistemas

Para satisfazer a confiabilidade do sistema, a manufatura de equipamentos deve levar em conta a necessidade de confirmação da confiabilidade dos equipamentos.
Esta confirmação é ratificada a partir do registro de banco de dados das empresas ou de ensaios, em laboratórios, acelerando (estressando) estes equipamentos até a falha.

O nível de confiabilidade dos componentes destes equipamentos deve ser compatível com o nível do sistema onde vai ser empregado, sendo esse um requisito de projeto.

A princípio entende-se que projetar um equipamento confiável significava selecionar corretamente seus componentes e empregá-los conforme recomendação do fabricante. Entretanto, com o aumento da sofisticação e da severidade das conseqüências das falhas de sistemas, passou-se a empregar técnicas mais sofisticadas de predição de confiabilidade, ainda em sua fase inicial, complementadas com a execução de cálculos probabilísticos que visam simular a operação e a identificação de possíveis falhas.

A partir do resultado desses experimentos avalia-se a confiabilidade do sistema, verificando-se o cumprimento das exigências do projeto ou a necessidade de modificações no projeto, para a obtenção do aumento da confiabilidade.

O projeto de um equipamento mecânico deve garantir que o mesmo permaneça operacional por um período de tempo específico, sem apresentar falhas que causem a interrupção parcial ou total de sua operação. Considerando como requisito de projeto as condições ambientais associadas à sua operação, bem como condições específicas de utilização (ABERNETHY, 2000; LAFRAIA, 2001; LEITCH, 1995; MOUBRAY, 2000; RELIASOFT CORPORATION, 2000; SCAPIN, 1999).

A análise da confiabilidade de um equipamento mecânico deve ser executada ao longo do projeto com o auxílio de técnicas denominadas "ferramentas" de confiabilidade. Tal análise tem por objetivo definir os seguintes pontos:

(1) Quais os principais modos de falha associados aos componentes do sistema;

(2) Qual o comportamento estatístico desses modos de falha;

(3) Qual a progressão da falha de um componente ao longo do tempo e do sistema e as suas conseqüências sobre a operacionalidade.

Pode-se definir confiabilidade como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. A caracterização da confiabilidade e de sua vertente estatística se faz necessária como ferramenta de acesso ao tratamento da falha, isto porque uma operação confiável é aquela menos sujeita a falhas ou até isenta das mesmas. Segundo Lafraia (2001), falha funcional é a incapacidade de qualquer item atingir o padrão de desempenho esperado.

Tomando-se a definição de confiabilidade apresentada pela norma NBR-5462 (1994), "Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo", destacam-se alguns pontos importantes:

- Um desempenho específico é esperado para que possa ser definido caso o componente ou sistema cumpra suas funções de forma satisfatória;
- Condições de uso devem ser especificadas;
- Há um período de tempo de utilização especificado.

Vale salientar alguns outros pontos na determinação da confiabilidade. Primeiramente, a função operacional do equipamento deve ser claramente definida, pois isto permite reconhecer as formas de utilização e eventuais modos de falha. Posteriormente, o ambiente de operação deve ser bem caracterizado, com aspecto complexo, o que inclui o meio físico bem como as ações de manutenção e operação.

Finalmente, deve-se enfatizar o tempo de utilização que pode expressar a severidade de uso imposta ao equipamento.

A confiabilidade é uma grandeza mensurável a partir da análise estatística da ocorrência do evento falha. Sua observação e tratamento estatístico são relevantes para a ciência da confiabilidade. A partir desta análise pode-se obter a probabilidade citada na definição de confiabilidade.

A experiência no trato com os equipamentos possibilita a Engenharia conhecer empiricamente alguns modos de falha, como fadiga, desgaste e corrosão. Modo de falha pode ser definido como o mecanismo pelo qual um item deixa de executar sua função corretamente. Atualmente, a determinação dos modos de falha é preferencialmente feita antes da comercialização, ou seja, em sua fase de projeto. Pode-se, para tanto, recorrer à simulação, aos ensaios de laboratório e de campo.

O modo de falha dos componentes é função das solicitações a que o mesmo será submetido durante sua operação. É possível que haja alterações neste modo de falha caso solicitações limites previstas no projeto sejam ultrapassadas.

2.4.1.1 Confiabilidade de bombas

A confiabilidade de bombas no cenário mundial das indústrias que utilizam este equipamento em seus processos é desconhecida para o grande público interessado nessa informação, entretanto, ela existe e ocupa banco de dados próprios, particulares e reservados.

Taxas de falhas e registros de disponibilidades são encontradas em literatura e em normas. A boa prática de se armazenar registros de tempo de reparos de bombas como o Tempo médio entre falhas (MTBF, em inglês) é de grande importância para os usuários, pois possibilita os cálculos estocásticos da confiabilidade.

Pesquisando os bancos de dados de falha e de ações de manutenção no Brasil, verificou-se que não há uma base de dados que possa subsidiar a análise de confiabilidade e de mantenabilidade, tanto no setor industrial quanto acadêmico. Certamente, há empresas que possuem algumas informações para suas próprias análises, porém tais dados ficam restritos a elas. Em nível internacional há bases de dados com informações de falhas e reparos como o *Offshore Reliability Data* (Oreda), *Government Industry Data Exchange Program* (GIDEP), *Reliability Analisys Center* (RAC) dentre

outras. Esses organismos vendem pacotes contendo dados de falha de alguns sistemas técnicos, que retratam uma realidade específica ao seu campo de atuação.

Dessa forma, Bloch e Budris (2010) fazem alusão a estatística de falhas em bombas da indústria internacional. Por conveniência, essas estatísticas de falhas são comumente traduzidas no MTBF.

Em um esforço para evitar argumentos sobre elas, no começo dos anos 2000, muitas indústrias respeitadas simplesmente tomaram o número de bombas instaladas e o dividiram pelo número de incidentes de reparo por ano. Qualquer substituição de componente, seja qual fosse ele, seria contada como incidente de reparo, sendo mostrado da mesma forma nas estatísticas do MTBF. Utilizando a mesma estratégia de aferição - e também de dados publicados e observações feitas durante os estudos de eficiência da manutenção e auditorias em confiabilidade no fim dos anos 1990 e começo dos anos 2000 – o MTBF da Tabela 1 a seguir foi estimado (BLOCH; BUDRIS, 2010).

Tabela 1 - Tempo Médio entre Falhas de Bombas

Bombas ANSI, regulares, USA	2,5 anos
Bombas ANSI/ISO, regulares, Indústrias Escandinavas	3,5 anos
Bombas API, regulares, USA	5,5 anos
Bombas API, regulares, Oeste Europeu	6,1 anos
Bombas API, refinarias voltadas ao reparo, país em desenvolvimento	1,6 anos
Bombas API, região do Caribe	3,9 anos
Bombas API, alto nível, U.S. Refinery, Califórnia	9,2 anos
Todas as Bombas, indústria petroquímica de alto nível, USA (Texas)	10,1 anos
Todas as Bombas, grandes companhias petrolíferas, USA (Texas)	7,5 anos

Fonte: BLOCH; BUDRIS, 2010

Um exemplo, utilizando a seguinte equação para relacionar o MTBF dos componentes de uma bomba,

$1/m^2_s = 1/m^2_1 + 1/m^2_2 = 1/m^2_3 = 1/m^2_4$

Onde:

ms = MTBF do sistema

m(1, 2, 3, 4) = MTBF dos respectivos itens

Na Tabela 2 a seguir verificam-se os dados gerados a partir da variação única da vida do selo e o efeito disso na vida da bomba, em anos (BLOCH; BUDRIS, 2010).

Tabela 2 - Efeito da variação da vida do selo na vida da bomba

Vida do Selo Mecânico (anos)	Vida da Bomba (anos)
0,8	0,758
1,2	1,070
1,6	1,326
2,0	1,523
2,4	1,687
2,8	1,809
3,2	1,905

Fonte: BLOCH; BUDRIS, 2010

Propondo-se que a vida do selo possa ser de três ou cinco anos, avalia-se tal efeito de variação na vida da bomba, uma vez mantida a vida dos outros componentes sem modificações, na Tabela 3 (BLOCH; BUDRIS, 2010):

Tabela 3 - Vida da bomba em função da vida do selo

Componentes	Vida (anos)	
Selo	3	5
Mancal	10	10
Acoplamento	20	20
Eixo	15,4	15,4
Vida da Bomba	2,797	4,2

Fonte: BLOCH; BUDRIS, 2010

Tomando por base os níveis de ciclo de vida, alcançados na prática em 2000 e combinado com o que é conhecido como “Boas Práticas”, recomenda-se os tempos de vida dos componentes da Tabela 4 (BLOCH; BUDRIS, 2010).

Tabela 4 - Tempos de vida recomendados para bombas e seus respectivos componentes

Selo		Refinarias	Indústrias Químicas de outros tipos
	Excelente	90 meses	55 meses
	Regular	70 meses	45 meses
Acoplamentos	Todas as Indústrias		
	Tipo membrana		120 meses
	Tipo engrenagem		>60 meses
Mancal	Todas as Indústrias		
	Operação Contínua		60 meses
	Operação Intermitente		120 meses
Bombas	Baseado em sistema de cálculo em série		
	48 meses		

Fonte: BLOCH; BUDRIS, 2010

2.4.2 Ferramentas da confiabilidade

Para a avaliação da progressão da falha de um componente ao longo do sistema, torna-se necessário o emprego de técnicas de análise de confiabilidade mais complexas. A sofisticação dos equipamentos, os requisitos cada vez mais exigentes quanto a segurança e a necessidade de dominar os fenômenos relativos aos equipamentos e seus desdobramentos deram origem ao método denominado **FMEA** (**do inglês *Failure Modes and Effects Analysis)***, utilizado em análises de confiabilidade (PALADY, 1997).

2.4.2.1 FMEA – Modos de falhas e seus efeitos

"O FMEA teve sua origem nos Estados Unidos em 1949, como um padrão para as operações militares - *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and*

Criticality Analysis (Military Procedure MIL-P-1629). Esta norma foi utilizada como uma técnica de avaliação da confiabilidade para determinar os efeitos nos sistemas e falhas em equipamentos. As falhas foram classificadas de acordo com seus impactos nos sucessos das missões e com a segurança pessoal/equipamento" (www.fmeca.com, 2000).

O desenvolvimento da análise de confiabilidade de um sistema tem início utilizando-se de uma técnica de identificação de falhas que seja sistemática e que considere integralmente o item (sistema, subsistema, etc.), objeto da análise. Muitas são as técnicas disponíveis para essa identificação, e uma das mais minuciosas é a **FMEA**. (KUMAMOTA, 1996; ISO 14224, 2006; PALADY, 1997). O **FMEA** permite um conhecimento detalhado do sistema pelo analista, facilitando seu entendimento e exigindo uma interação com o projetista. Embora demande um tempo considerável, a elaboração desta técnica pode ser empregada como resolução desejada, seja para equipamento, ou para seus componentes. É um processo aplicável a qualquer fase do projeto, identificando aspectos qualitativos relevantes à análise de segurança de uma forma geral. Por meio dela procura-se identificar os efeitos provocados por falhas simples no sucesso operacional do sistema considerado, bem como os métodos de detecção e os mecanismos de minimização do impacto.

Como método, o **FMEA** tem diretrizes gerais que norteiam sua elaboração. Basicamente, a elaboração do mesmo exige a reflexão sobre cinco questões a respeito do sistema (PALADY, 1997):

(1) Como cada componente do sistema pode falhar;
(2) Quais os efeitos dessa(s) falha(s) sobre o sistema;
(3) Quão críticos são esses efeitos;
(4) Como detectar a falha;
(5) Quais as medidas contra essas falhas (evitar, prevenir a ocorrência das mesmas ou minimizar seus efeitos).

Por conseguinte, o **FMEA** torna-se um método qualitativo de análise da confiabilidade. A fim de complementar esta análise qualitativa, devem-se executar ensaios que permitam verificar as hipóteses empregadas nos projetos dos mesmos, bem como avaliar se os modos de falha previstos são aqueles que surgirão durante a operação do sistema no campo. O valor numérico da confiabilidade de um equipamento

complexo deve ser preferencialmente determinado de forma experimental, dada a escassez de informações sobre a confiabilidade de seus componentes.

2.4.2.2 Árvore de Falhas

O **FTA,** análise de árvore de falhas, foi desenvolvido pela Boeing, na década de 1960, com o propósito de se estudar a eliminação de falhas do trem de pouso de suas aeronaves (KUMAMOTA, 1996).

A árvore de falhas pode ser uma análise do tipo quantitativa e qualitativa. Na análise qualitativa, o objetivo pode determinar as causas básicas de um evento ou a seqüência de acontecimentos que levou ao mesmo. Na análise quantitativa, o objetivo é determinar a probabilidade da ocorrência do evento.

A análise de árvore de falhas pode ser aplicada a qualquer evento indesejado, principalmente eventos e/ou sistemas complexos.

O objetivo da árvore de falhas é a obtenção, através de um diagrama lógico do conjunto mínimo, de causas (falhas) que levam ao evento em estudo. Além disso, é possível obter a probabilidade de ocorrência do evento indesejado (KUMAMOTA, 1996; ISO 14224, 2006).

A metodologia consiste nos seguintes passos:

- Seleção do evento topo;
- Determinação dos fatores contribuintes;
- Diagramação lógica;
- Simplificação booleana;
- Aplicação dos dados quantitativos;
- Determinação da probabilidade de ocorrência.

2.4.2.3 BlockSim

O software BlockSim (nome comercial) foi desenvolvido pela empresa americana ReliaSoft que fornece ferramentas para modelar e analisar sistemas e/ou processos reparáveis, e atende às necessidades dos projetistas, operadores de equipamentos, gestores da manutenção e de ativos. Possui uma flexível plataforma de recursos para modelar sistemas e processos, utilizando Reliability Block Diagram

(RBD), Diagramas de blocos de confiabilidade e FTA. Possui diversas formas de configuração do RBD e as portas lógicas de eventos do FTA, incluindo funcionalidades para modelar sistemas complexos com a combinação de vários cenários. Inclui análise de confiabilidade, mantenabilidade, disponibilidade, otimização da confiabilidade, produção (through put), alocação de recursos, Life Cycle Cost (LCC), custo do ciclo de vida e outras análises.

Pode-se utilizar o recurso aplicando do RBD diagramas de bloco de confiabilidade e/ou análise de falhas de árvore FTA, conforme Figura 9.

O software processa os dados conforme configurados previamente pelo usuário. Estes dados são provenientes de bancos de dados do cliente ou de fontes como o Oreda. Usando um algoritmo, o BlockSim calcula analiticamente a função exata da confiabilidade do sistema, mesmo para os sistemas mais complexos. Os resultados calculados incluem confiabilidade, taxa de falhas, MTTF, tempo de garantia, gráfico pdf, e gráficos de importância da confiabilidade. O usuário poderá incorporar o custo e informações de melhoria de confiabilidade viável para determinar a estratégia com o melhor custo-benefício e assim alcançar a meta de confiabilidade do sistema.

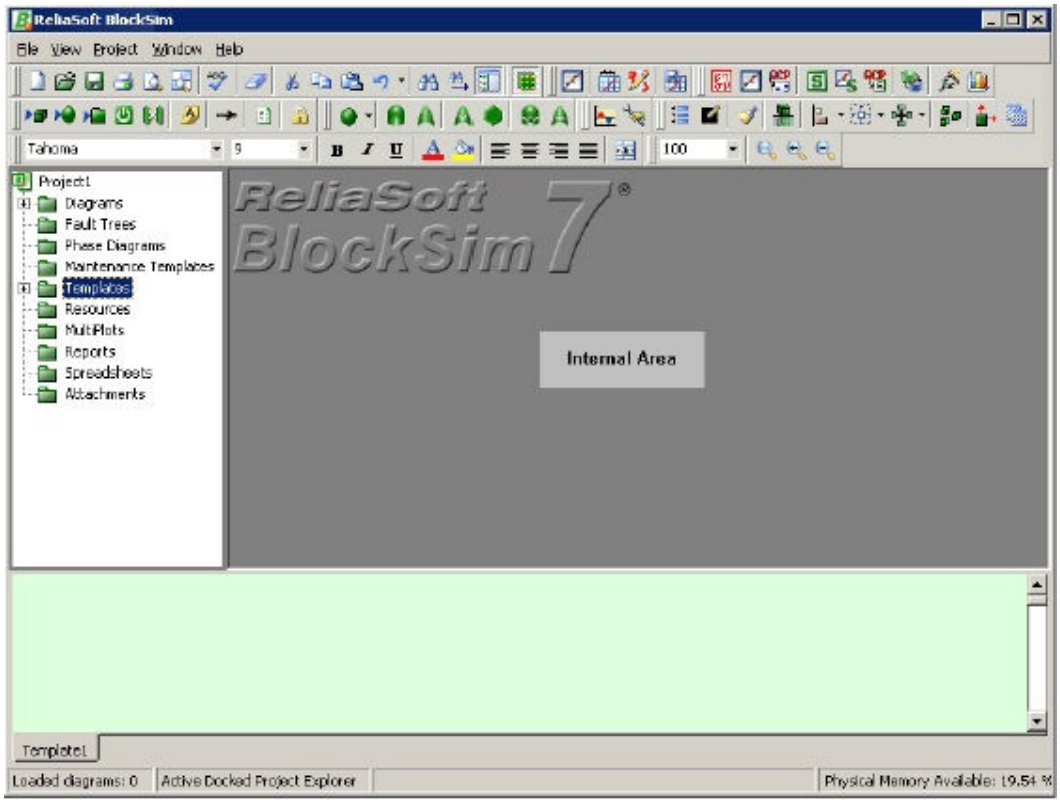


Figura 9 - Tela inicial do Block Sim

Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

O ***BlockSim*** possibilita:

- Identificar os componentes críticos (ou modos de falha) e determinar as formas mais eficazes para melhorar o desempenho do sistema através de melhorias na concepção e/ou planejamento de manutenção;
- Simular para obter métricas de desempenho estimado que possam facilitar o processo decisório em uma variedade de áreas (agendamento de manutenção planejada, planejamento de peças de reposição, identificando pontos de estrangulamento na capacidade de produção) e a pressuposição dos custos do ciclo de vida.
- Identificar as vulnerabilidades de um sistema e determinar as formas mais eficazes para reduzir o risco.
- Realizar a simulação de sistemas para estimar confiabilidade, disponibilidade e ciclo de vida do equipemento.

- Disponibilidade média;
- Tempo médio entre falhas;
- Número de falhas esperadas;
- Custos (peça/mão-de-obra);
- Produção .

2.4.2.4 Simulação

A simulação pode representar um fator positivo na tomada de decisão, permitindo a realização de inferências, por meio de experimentos sobre o comportamento dos sistemas. Tal constatação proporciona a possibilidade de examinar e avaliar diversos planos muito antes de acatar projetos importantes. Uma vez determinado o plano mais conveniente, aquele que contém o máximo de vantagens e o mínimo de desvantagens, pode ser aplicado na prática na situação real (ESCUDEIRO,1973).

A simulação segue uma etapa lógica de etapas para a elaboração de um modelo: a identificação do problema; a introdução das variáveis associadas ao problema; a construção do modelo; o teste do modelo; a realização do experimento; a avaliação dos resultados e possíveis necessidades de alterações no modelo ou nos dados imputados; e a decisão do curso de ação (RENDER; STAIR 1997).

Existem dois tipos de modelos de simulação: o determinístico e o probabilístico. No determinístico, segundo Reis e Martins (2001, p. 58) "pressupõe-se que os dados são obtidos com certeza". O modelo não incorpora, portanto, as probabilidades de que o valor escolhido para simulação sofra alterações futuras. Já o segundo modelo incorpora o comportamento probabilístico no relacionamento interno do sistema, na tentativa de capturar a natureza probabilística envolvida nas variáveis que cercam o sistema, por meio da utilização da técnica estatística e do uso de computadores (NASCIMENTO; ZUCCHI, 1997).

Os modelos de simulação probabilísticos tiveram origem no método de Monte Carlo e têm como foco simulações de fenômenos aleatórios, introduzindo a análise de riscos, incorporando as variáveis ambientais e, conseqüentemente, os elementos de incerteza inerentes (NASCIMENTO; ZUCCHI, 1997).

2.4.2.4.1 Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo tem esse nome devido a famosa roleta de Monte Carlo, no principado de Mônaco. O desenvolvimento sistêmico do método data de 1944, quando da Segunda Guerra Mundial, período em que foi ferramenta de pesquisa para o desenvolvimento da bomba atômica.

Hammersey e Handscomb (1964, p. 3) definem o método de Monte Carlo como sendo "a parte da matemática experimental que está preocupada em experiências com números aleatórios". O método de Monte Carlo é uma expressão muito geral, na qual as formas de investigação baseiam-se no uso de números fortuitos e estatística de probabilidade.

Este método consiste na substituição do estudo de um processo físico ou matemático por um modelo probabilístico que possa tratar problemas determinísticos por meio de amostras aleatórias ou por meio de números pseudo-aleatórios gerados por um computador (ESCUDERO,1973).

Para executar o método de Monte Carlo, existem umas fases básicas que devem ser seguidas, definições das variáveis envolvidas com base em dados passados ou em estimativas subjetivas dos administradores; identificação das distribuições de probabilidades das variáveis aleatórias relevantes para o estudo; construção das probabilidades acumuladas para cada uma das variáveis definidas; definição dos intervalos dos números aleatórios para cada variável; geração dos números aleatórios e simulação dos experimentos (LUSTOSA; PONTE; DOMINAS, 2004).

Convém ressaltar que as populações analisadas devem ter certos parâmetros, como média e desvio padrão. Podem apresentar vários comportamentos considerados normais. Exponencial e uniforme. As amostras obtidas devem ser aleatórias. Para tanto, é preciso obter uma seqüência de números aleatórios. Os números gerados são pseudo-aleatórios, todavia, geralmente são suficientes para se obter aproximações razoáveis de números aleatórios inteiros e podem ser utilizados para obter amostras aleatórias sobre alguma população de interesse.

A distribuição de freqüência estatística de interesse é freqüentemente chamada de distribuição aleatória empírica e pode ser comparada com a distribuição aleatória teórica apropriada. Para isso, é preciso confrontar o comportamento da distribuição

aleatória empírica com a distribuição aleatória teórica (BARROS; MAZUCHELI, 2005).

2.4.3 Banco de dados

Bancos de dados de confiabilidade são desenvolvidos para otimizar os processos produtivos que dependem de equipamentos sujeitos a falhas. Estes bancos de dados, elaborados a partir da medição precisa de tempo de falha de equipamentos, permitem melhorar o desempenho da manutenção através da adoção da melhor política e prática de manutenção. Permitem inclusive inferir no projeto e nas condições operacionais de segurança das pessoas e do meio ambiente. A fim de alcançar esses objetivos, os bancos de dados de confiabilidade devem ser construídos com dados oriundos do sistema de interesse que reflitam as características funcionais e de projetos dos equipamentos, as condições ambientais de operação e as políticas de manutenção. Diferentes segmentos da indústria têm desenvolvido bancos de dados genéricos. É o caso do segmento de petróleo e gás.

As indústrias de petróleo, gás natural e petroquímica têm demandado especial atenção ao *Reliability, Availability, Maintenance and Safety* (**RAMS),** confiabilidade, disponibilidade, mantenabilidade e segurança de equipamentos. Também têm direcionado ênfase significativa ao custo efetivo de projeto e manutenção para novas plantas e instalações existentes. Análises de **RAMS** servem de base para decisões na área de operação, fabricação e Engenharia *Offshore e Onshoren*. As informações de falhas, mecanismos de falhas e manutenção precisam ser transmitidas entre as várias áreas de uma mesma companhia e entre companhias.

Utilizam-se várias metodologias seja para estimar o risco às pessoas e ao meio ambiente (APR, Hazop, Hazid, diagrama causa efeito, etc) seja para avaliar a planta ou desempenho do sistema. Para esta análise, os dados de confiabilidade e manutenção são vitais. Dados coletados anos a fio devem ser acumulados para garantir confiança a análise dos resultados e ao suporte nas decisões relevantes. Tal atividade deve ser planejada para que se tenha clareza das causas de falhas. Eis a chave para priorizar e implementar ações corretivas as quais resultarão em aumento de segurança e redução de custos.

A coleta de dados exige grandes investimentos e padronização combinados a um efetivo gerenciamento eletrônico dos mesmos. Atualmente a ISO/CD 14224, que é uma norma internacional, tem o objetivo de padronizar a coleta e as informações relevantes. Em termos de bancos de dados tem-se o Oreda, que é um *handbook*, contendo taxas de falhas de alguns componentes de sistemas de produção, inclusive da Árvore de Natal Molhada (ANM). Reconhecido na indústria de petróleo, o *Well Master* é dedicado a atividades de poço e o *Subsea Master,* a equipamentos submarinos, sendo ambos bancos de dados e aplicativos de análise montados em plataforma Windows (SMITH, 1975).

2.4.3.1 Oreda

O Oreda é um banco de dados de confiabilidade de equipamentos de processo, segurança e submarinos. Compreende dados de uma grande variedade de plataformas, tipos de equipamentos e condições operacionais. Esse projeto foi concebido por grandes empresas produtoras de petróleo e gás de vários países, reunindo mais de 33.000 registros de falhas, contabilizados a partir do início dos anos de 1980. O projeto Oreda tem início em 1981 com o objetivo de coletar dados para análises de confiabilidade. Foi ampliado para abranger os equipamentos usados na exploração e produção de petróleo e gás. A proposta primária era abranger equipamentos submarinos e de topo (*topside*) de plataformas *offshore*, inclusos alguns equipamentos de terra.

As fases do projeto Oreda estão resumidas a seguir:

Fase I (1983 - 1985): Coletar e compilar dados de operações de perfuração e produção, demonstrando a habilidade de oito companhias em cooperação mútua para criar um banco de dados comum, de uma larga população, mas com poucos detalhes. Os dados foram publicados na edição de 1984;

Fase II (1987 – 1990): O escopo foi ajustado para a coleta de dados de equipamentos críticos, para a melhoria da qualidade dos dados e para o armazenamento em um banco de dados computadorizado. O banco de dados da fase II contém mais de 1.600 equipamentos com mais de 8.400 eventos de falhas. O *software* Oreda foi desenvolvido para ajudar na coleta e análise dos dados. Os dados foram publicados na edição de 1992, acrescidos das informações da edição anterior;

Fase III (1990 – 1992): O número de categorias de equipamentos foi incrementado e mais dados de programas de manutenção foram coletados. O nível de excelência dos dados foi aperfeiçoado através de orientações para sua coleta e controle de qualidade. Foi modificado o software com uma proposta mais geral de ferramentas de coleta e melhorada a interface com o usuário. O banco de dados da fase III contém mais de 7.600 equipamentos, com mais de 11.150 eventos de falhas. Os dados foram publicados na edição de 1997, que somente contém dados desta fase. As fases I e II estão na edição de 1992;

Fase IV (1993 – 1996): Um novo *software* foi desenvolvido para coleta e análise de dados e procedimentos para importação e conversão automática de informações. Os dados coletados foram os mesmos dos equipamentos da fase III e foram incluídas informações de manutenção planejada. Estas não constaram na edição de 1997. Uma atividade paralela a esta fase foi o *draft* da ISO/DIS 14224, "*Petroleum and Natural Gas Industries – Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment*" (PETROBRAS, 2005);

Fase V (1997 – 2000): Algumas novas classes de equipamentos foram incluídas e priorizou-se a coleta de dados submarinos. Como tarefa paralela, a ISO 14224, foi implementada em julho de 1999.

Nas edições do Oreda constam as seguintes informações:

• *Taxonomy*: Numeração atribuída de acordo com a posição na taxonomia do sistema;

• *Item:* Descrição do item de acordo com a taxonomia;

• *Description:* Informação adicional do item quando disponível;

• *Application:* Descrição da função do item examinado durante o período de observação dos dados.

• *Operational modes*: Modos operacionais - Contínuo, Ativo (condição de descanso) e Ativado (de uma condição de espera).

• *Internal environment:* Descrição do meio interno ao qual o item está submetido.

• *External environment:* Descrição do meio externo ao qual o item está submetido.

• Testing and maintenance: Intervalo de teste e rotina de serviços.

• *Failure cause*: Informação da causa da falha.

• *Failure mode*: Informação do modo de falha.

• *Data souce*: Referências.

• *Boundary specification*: Especificação da interface entre o item e sua fronteira.

O Quadro 2 ilustra como estão distribuídos os sistemas com as classes de equipamentos, cujas edições do OREDA abrangem.

Sistemas	**Classe de Equipamentos**	**Edições do OREDA (número de unidades relatadas)**					**Soma**
		1984	**1992**	**1997**	**2002**		
		Fase I 1983-83	**Fase II 1987-90**	**Fase III 1990-92**	**Fase IV 1993-96**	**Fase IV 1997-00**	
Máquinas rotativas	Turbina a gás		109	54	54	28	247
	Compressores	17	50	45	75	56	243
	Máquinas de combustão				39	64	103
	Bombas	478	271	103	294	152	1298
	Turboexpansores				7	8	15
	Geradores elétricos	76		49	87	8	220
	Motores elétricos				56	122	178
Equipamentos estáticos	Vasos	359	329	54	148	51	941
	Aquecedores e resfriadores				8	1	9
	Trocadores de calor	519	170	75	51	17	832
Outros equipamentos de topo de plataforma	Válvulas	658	645	899	821	349	3372
	Detecção de gás e fogo	3683		5828	79	779	10369
	Controladores/sensores processo	3740		487	140	69	4436
Miscelânia de equipamentos da fase I (somente)	Sistemas elétricos	1321					1321
	Sistemas de segurança	1703					1703
	Sistemas de utilidades	1035					1035
	Sistema de perfuração	880					880
Equipamentos submarinos	Sistemas de controle			14		17	31
	Cabeça de poço e ANM			21		83	104
	Pipelines					144	144
	Template					4	4
	Manifold					29	29
	Risers					42	42
	Runnig tools					6	6
	Misc. Equipamentos fase II						15
Total		14469	1589	7629	1841	2037	27565

Quadro 2 – Sistemas e equipamentos considerados nas edições do Oreda.

Fonte: OREDA, 2009

A seguir é apresentado o formulário de dados como demonstrado no Quadro 3. Cada formulário contém a identificação do item e os parâmetros de confiabilidade estimados.

<table>
<tr><td colspan="3">Taxonomia nº (Taxonomy no)</td><td colspan="8">Itens</td></tr>
<tr><td rowspan="2">População (Population)</td><td rowspan="2">Amostras (Samples)</td><td colspan="3">Tempo agregado no serviço (10^6 horas)
Aggregated time in service (10^6 hours)</td><td colspan="4" rowspan="2">Nº de demandas (No of demands)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tempo calendário (Calendar time)*</td><td>Tempo operacional (Operational time)†</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Modo de falha (Failure mode)</td><td rowspan="2">Nº de falhas (No of failure)</td><td colspan="3">Taxa de falhas (por 10^6 horas)
Failure rate (per 10^6 hrs)</td><td rowspan="2">Atividade de reparo (horas) Active repair (hours)</td><td colspan="3">Reparo (Horas-homem)
Repair (manhours)</td></tr>
<tr><td>Inferior (Lower)</td><td>Médio (Mean)</td><td>Superior (Upper)</td><td>Mínimo (min)</td><td>Médio (mean)</td><td>Máximo (max)</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="10">Comentários (Comments):</td></tr>
<tr><td colspan="10"></td></tr>
</table>

Quadro 3 - Modelo da página do Oreda para apresentação dos dados.

Fonte: OREDA, 2009

As informações que constam na página estão descritas abaixo:

• ***Taxonomy number and item*** - Descrição de acordo com a lista que será apresentada nas edições específicas.

• ***Population*** - Total do número de itens que formaram a base da estimativa.

• ***Samples*** (1ª edição), ***Installations*** (2ª edição) - Número total de amostras ou instalações de onde foram coletadas as informações.

• ***Aggregated time in service*** - Dois tipos de escalas de tempo são apresentados: tempo calendário e tempo operacional. O tempo acumulado para a população total é dado para ambas as escalas de tempo.

• ***Number of demands*** - É o número acumulado de demandas/ciclos para a população total, fornecido quando disponível.

• ***Failure mode*** - Contém a descrição resumida da forma como a falha ocorreu, quando a informação for disponível.

• ***Number of failure*** - O número total de evento de falhas é apresentado para cada modo de falha. O número acumulado de falhas é apresentado como todos os modos (*All modes*).

• ***Failure rate*** - Apresenta a taxa de falha para cada modo de falha. O valor médio representa a estimativa baseada nas informações disponíveis para apresentação usando o estimador Oreda. Os valores superiores e inferiores estabelecem o intervalo de incertezas e representam 90% do intervalo de confiança. O desvio padrão ***Standard Deviation* (SD)** indica a variação entre as múltiplas amostras. A taxa da falha estimada para amostras homogêneas é dada na coluna "n/τ". A taxa de falha medida por 106 horas refere-se ao tempo calendário (marcado *) ou tempo operacional (marcado †).

• ***Active repair*** - É a média do tempo calendário (em horas) para se analisar a falha, reparar e retornar ao serviço.

• ***Repair*** - Apresenta vários valores para o tempo de reparo (horas-homem). O valor médio representa a estimativa baseada nas informações disponíveis para apresentação. Os valores mínimos e máximos equivalem aos menores e maiores números de homens-hora para a atividade.

• ***Comments*** – Aqui, a informação a respeito da probabilidade de falha na demanda é dada quando disponível. O valor médio representa a estimativa baseada nas informações disponíveis para apresentação. Os valores superiores e inferiores estabelecem o intervalo de incertezas e representam 90% do intervalo de confiança. Outros comentários, quando necessários, também são disponibilizados aqui.

Modelo dados para modos de falhas do Oreda

Na parte de Bombas são descritos os modos de falhas levantados para bombas centrífugas, subdivisão de componentes comuns, como descrito no Quadro 4. Onde os dados de falhas para componentes comuns são:

Ruído: Nível de pressão sonora acima de 85 db caracteriza um modo de falha;

Vibração: Falhas decorrentes de equipamentos ou sistemas com vibração monitorados;

Manutenção: falhas decorrentes de manutenções mal feitas, retrabalhos;

Erro de parâmetro: Equipamento funcionando fora de especificações;

Perda espúria: Perda desconhecida, inesperada;

Desconhecido: Falha desconhecida, fora da taxonomia;

Outros: Outras falhas mais relevantes que não estão entre a taxonomia;

Quebra: Falha e parada do equipamento por fadiga, fissura, trinca, cisalhamento, etc;

Vazamento processo: Falhas no processo que levem a vazamento do fluído;

Baixo rendimento: Equipamento apresenta rendimento abaixo do especificado ou do esperado no processo;

Vazamento utilidades: Equipamento apresenta vazamento de fluidos com óleo lubrificante, óleo refrigerante, ar ou gases de instrumentos;

Vazamento interno: Equipamento apresenta falhas decorrentes de vazamento fluido utilizado internamente;

Alta temperatura: Equipamento apresenta temperatura acima da especificada para trabalho normal;

Defeito estrutural: Falhas decorrentes de erros de projetos e/ou de fabricação.

Modos de falhas	Abreviação
Ruído	**RUI**
Vibração	**VIB**
Manutenção	**MAN**
Erro de parâmetro	**ERR**
Parda espúria	**PAR**
Desconhecido	**DES**
Outros	**OUT**
Quebra	**QBR**
Vazamento processo	**VAP**
Baixo rendimento	**RND**
Vazamento utilidades	**VZU**
Vazamento interno	**VZI**
Alta temperatura	**ATP**
Defeito estrutural	**DEF**

Quadro 4 - Nomenclatura dos modos de falha para bombas centrífugas

Fonte: OREDA, 2009

2.4.4 Política de manutenção baseada na confiabilidade

O processo de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) foi desenvolvido em 1974 quando uma comissão do departamento de defesa dos Estados Unidos da América foi convocada para desenvolver um programa de manutenção para a indústria de aviação civil. O resultado deste programa foi um relatório escrito por *Stanley Nowlan*

e Howard Heap, da empresa *United Airlines*, que deram a ele o título de *Reliability Centered Maintenace* (RCM), manutenção centrada em confiabilidade, (MOUBRAY, 2001).

Este é um processo que pode aumentar a eficiência da manutenção e que analisa se, e quando, a manutenção é tecnicamente factível, bem como sua efetividade (custo-benefício). Visa, ainda, preservar as funções do sistema ou produto através da técnica de FMEA, gerando um Plano Integrado de Manutenção.

Segundo Moubray (2001), o processo do RCM proporciona uma redução de 40% a 70% dos trabalhos rotineiros de manutenção gerados em cada período. Ou seja, tarefas de manutenção pró-ativa realizadas ciclicamente e empreendidas antes da falha ocorrer, a fim de evitar que o item ou equipamento caminhe para um estado de falha. Elas contemplam a manutenção que é tradicionalmente conhecida tanto pelo termo preditiva como pelo termo preventiva.

Além disso, se o RCM for usado para desenvolver uma nova política de manutenção, a carga de trabalhos programada resultante é menor do que seria se o programa fosse desenvolvido por métodos tradicionais, conforme figura 10.

O MCC é um método estruturado para estabelecer a melhor estratégia de manutenção para um dado sistema ou equipamento. Identifica, *a priori*, a funcionalidade ou desempenho requerido pelo equipamento no seu contexto operacional. Identifica, em seguida, os modos de falha e as causas prováveis. Por fim, detalha os efeitos e conseqüências da falha. Isto permite não só avaliar a criticidade das falhas, mas também elucidar as conseqüências substanciais que afetam a segurança, a disponibilidade e o custo. A metodologia permite selecionar as tarefas adequadas de manutenção direcionadas para os modos de falha identificados. As estratégias de manutenção são integradas para se tirar vantagens de seus pontos fortes, de modo a aperfeiçoar a operacionalidade e a eficiência da instalação e dos equipamentos.

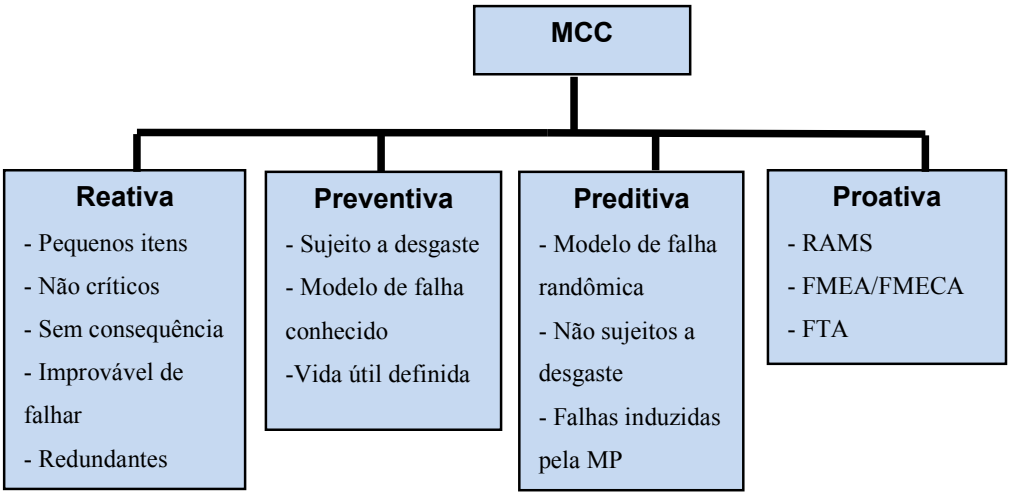


Figura 10 - Fluxograma da política de manutenção baseada em confiabilidade

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

Capítulo 3

Neste capítulo encontram-se a descrição da metodologia proposta, os materiais utilizados na pesquisa, os parâmetros considerados (Apêndice A, p. 145), as premissas sobre o ciclo de vida do equipamento e o uso do *software* com as informações do banco de dados do Oreda.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O hibridismo promovido pela utilização conjunta das duas técnicas **FMEA** e **FTA** permite que se selecionem os itens mais críticos em uma primeira análise qualitativa do **FMEA** e, posteriormente, em uma análise quantitativa pelo **FTA**.

Considera-se que esta combinação de recursos possibilitará uma representação mais realista dos problemas analisados e ajudará a definir as diretrizes mais confiáveis para o gerenciamento do sistema, incluindo a melhor técnica a ser adotada para a definição da melhor política de manutenção.

3.1 METODOLOGIA PROPOSTA

A modelagem da confiabilidade da bomba centrífuga (figura 11) foi dividida em seis etapas:

Etapa I - Elaboração da árvore funcional da bomba centrífuga, onde se deve definir qual efeito da falha de um dado componente sobre o desempenho operacional do sistema.

Etapa II - Análise qualitativa feita por uma **FMEA**, usando como parâmetro a norma Petrobras N-2781 (Técnicas Aplicáveis à Engenharia de Confiabilidade) nos itens relacionados à criticidade da falha, severidade, frequência e detecção.

Etapa III - Com os resultados da avaliação qualitativa, a análise da confiabilidade será feita através da **FTA** sobre todos os itens críticos que serão colocados na condição de eventos iniciais da árvore. A análise é baseada na estimativa da confiabilidade dos componentes do sistema, ao passo que a confiabilidade sistêmica é uma composição da confiabilidade dos componentes, respeitada a sua interligação funcional.

Etapa IV - Os dados sobre a taxa de falhas (dos itens que possuem dados provenientes do **Oreda)** permite conhecer o comportamento da bomba centrífuga durante o período considerado e, ainda, o comportamento de cada item separadamente.

Os cálculos serão processados no **BlockSim,** *software* comercial onde estão reunidas todas as informações em pacotes incluídos no programa. Tais pacotes acoplam técnicas para a análise de vida e **FTA**. Permitem simular milhões de vezes uma determinada situação ou situações.

Etapa V - Obter: disponibilidade média (todos os eventos); disponibilidade pontual; confiabilidade; quantidade esperada de falhas; tempo médio até a primeira falha (**TMAPF**); influência de cada item sobre o sistema; sua curva de vida (gráfico da confiabilidade *versus* o tempo); gráficos da probabilidade e da disponibilidade.

Etapa VI – Elaborar, com os dados provenientes da simulação e os dados de produção, uma tabela comparativa entre o tempo de vida calculado do equipamento e o tempo total da campanha ou exploração do reservatório. A partir desta análise, subsidiar, então, uma política de manutenção baseada em confiabilidade.

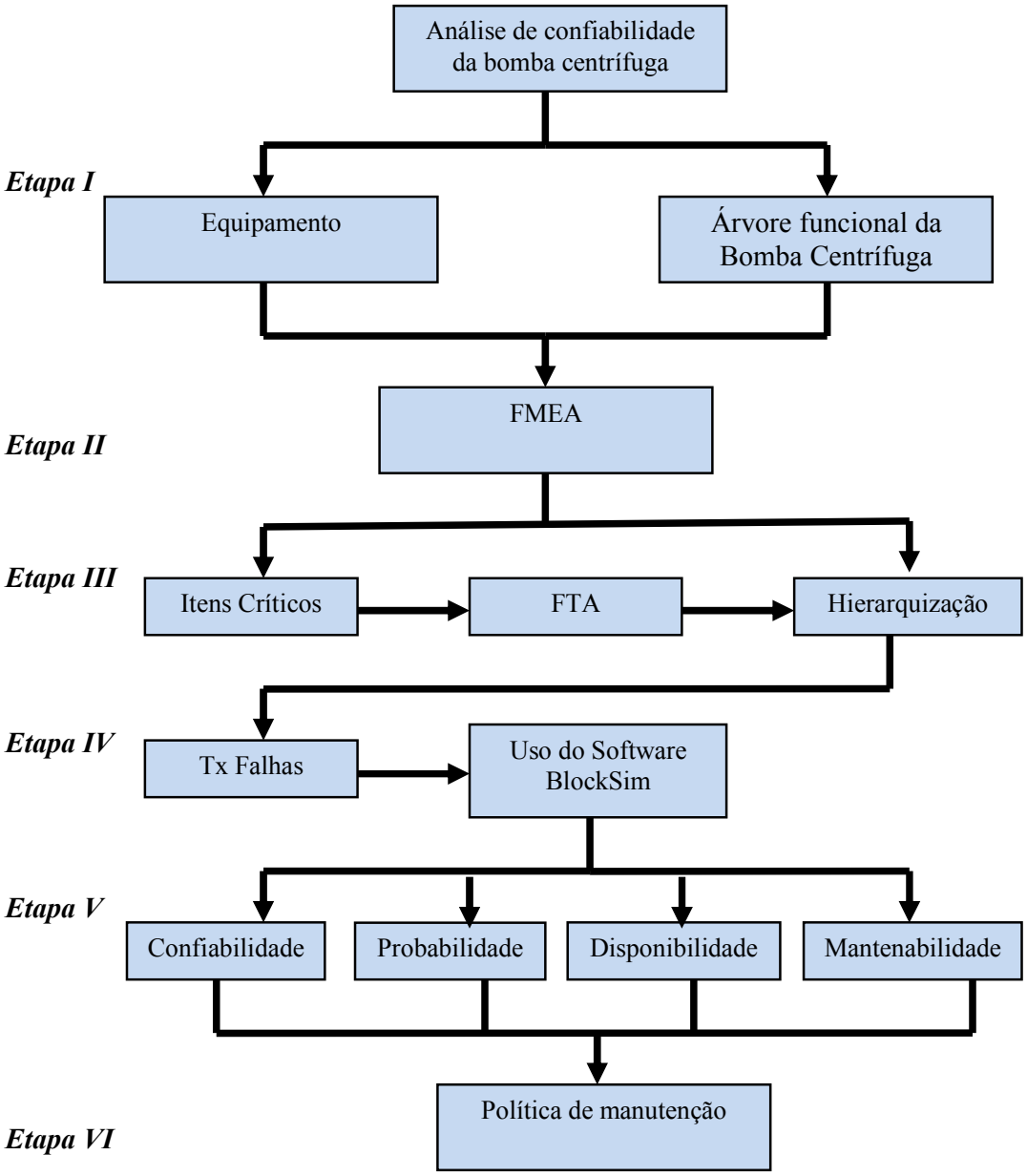


Figura 11 - Fluxograma da análise de confiabilidade de uma bomba centrífuga Metodologia

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.2.1 Árvore funcional da bomba centrífuga

O procedimento para análise de confiabilidade de sistemas baseia-se no estudo do sistema Bomba Centrífuga sob o ponto de vista da interligação funcional entre os seus componentes. Essa perfeita compreensão da contribuição de cada componente possibilita ao sistema executar a função segundo um desempenho previamente estabelecido. Para executá-la, propõe-se o emprego da árvore funcional associada ao uso da descrição funcional.

A análise é baseada na estimativa da confiabilidade dos componentes do sistema, sendo a confiabilidade deste, uma composição da confiabilidade dos componentes, respeitada a sua interligação funcional. Para avaliação da confiabilidade do sistema, propõe-se o uso do Diagrama de Blocos ou mesmo o emprego da Árvore de Falhas. Enquanto o uso do Diagrama encerra a definição da confiabilidade do sistema, o uso da Árvore de Falhas, por sua vez, é indicado para definir a probabilidade de ocorrência de uma condição operacional indesejada para o sistema.

Na figura 12, tem-se o diagrama da árvore funcional para a Bomba Centrífuga. Propôs-se que a Bomba fosse subdividida em nove subsistemas dependentes.

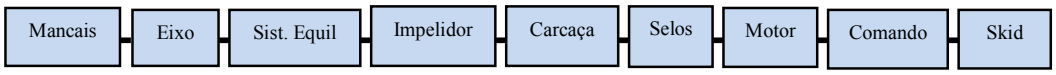


Figura 12 - Diagrama funcional proposto para bomba centrífuga

3.2.1.1 Descrição funcional

Na descrição funcional, escreve-se exatamente qual a função do componente no sistema bomba centrífuga:

Eixo: transmite potência do motor para compressão do fluido.

Impelidor: comprime o fluído progressivamente dentro da voluta em estágios sucessivos.

Dispositivo de equilíbrio: mantém o equilíbrio hidrodinâmico do conjunto roto/impelidor.

Selos: vedam a saída de fluido do interior da voluta.

Mancais: suportam o eixo da bomba, lubrificando-a.

Carcaça: contém o fluido bombeado.

Motor: responde pela força motriz de compressão da bomba.

Comando: controla e fornece energia para o funcionamento do motor.

***Skid**:* suporta e fixa o conjunto motor bomba.

3.2.2 Elaboração da FMEA

A **FMEA** é um processo indutivo, sistemático. O passo inicial é conhecer ao funcionamento do sistema através da coleta de dados de campo e entrevistas com especialistas (Preenchimento da figura 10).

Os termos utilizados na elaboração da planilha da **FMEA** são:

A - Item

É toda e qualquer parte (componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema) que pode ser individualmente considerada.

B - Função do Processo

É toda e qualquer atividade que o item desempenha, sob o ponto de vista operacional.

C - Falhas

Correspondem a impossibilidade de um item (função) cumprir com o seu papel no nível especificado ou requerido.

D - Efeitos Potenciais de Falha

É a descrição da maneira pela qual um item falha em cumprir sua função, ou ainda, é a conseqüência que o modo de falha tem sobre a operação, função ou estado de um item.

E - Severidade

Significância ou graduação do efeito do modo de falha na integridade do meio ambiente, das pessoas envolvidas, do sistema e da imagem da Companhia. (Anexo A, p. 140).

F - Classificação

Definida pelo cruzamento de dados entre a severidade e a frequência na Tabela de Criticidade**.** (Anexo A, p. 152).

G - Causas e mecanismos potenciais de falha

Todo processo químico ou físico, defeito de projeto, defeito de qualidade, uso indevido ou outros processos que sejam a razão básica para a falha ou que iniciem o processo físico anterior a falha.

H - Frequência de falhas

Número de eventos de falhas ocorridos, dividido pelo tempo "calendário" – tempo de operação no qual ocorrem tais eventos – ou pelo número total de demandas, segundo sua aplicação. (Anexo A p. 152).

I - Detecção

Meio ou método para se descobrir uma falha. Seja pelo operador sob condições normais de operação do sistema, seja pela equipe de manutenção / inspeção através de ação-diagnóstico. Quanto maior for o valor atribuído ao índice de detecção, maior será a dificuldade de detectar a falha. (Anexo A, p. 152).

J - Nível de Proteção e Risco (NPR)

É o produto entre a Freqüência *versus* a Ocorrência *versus* a Detecção.

O NPR é umas das maneiras de se hierarquizar os riscos. Esta percepção é observada a partir do resultado dos NPR's dos outros itens, comparativamente, como demonstrado nos resultados obtidos (Quadro 8, p. 112).

L - Itens de controle/monitoração da condição

Utilizados para registro e arquivo de banco de dados.

A planilha é preenchida através da opinião de especialistas reunidos para discussão sobre o assunto. É realizado um debate para se discutir os itens que vão compor a planilha do FMEA. Após definições dos itens, analisa-se a função no processo de cada item individualmente e determina-se o modo de falha que comprova o evento desse item sobre o sistema e os efeitos potenciais da falha.

A severidade dos efeitos dessa falha, sobre o sistema e a classificação, é feita através da análise da tabela da norma N-278 (Anexo A, p. 152), assim como a detecção e a freqüência da falha.

O mecanismo potencial de falha é proveniente da avaliação técnica ou consenso entre os especialistas.

Planilha de Análise de Falhas e seus Efeitos

NORMA N-2781	ANÁLISE DOS EFEITOS E MODOS DE FALHAS DOS PROCESSOS	REVISADOS															

3.2.3 Elaboração da FTA

A elaboração da Árvore de Falhas da Bomba Centrífuga se deu a partir da árvore funcional do equipamento proveniente da FMEA.

De acordo com a Árvore de Falhas da Bomba Centrífuga (Fig. 13), o sistema Bomba Centrífuga é composto por dez subsistemas: Carcaça; Eixo; Impelidor; Selos 1 e 2 (sucção e descarga); *Skid*; Mancais (lado acoplado e descarga); Motor e Comando (itens interligados em série formando um conjunto compressor).

Os itens citados devem suportar a função primária, que é aumentar a pressão do fluido para injeção. A propósito, o sistema Bomba Centrífuga deve ter um sistema de compressão que mantenha a pressão constante (Impelidor, Eixo e Carcaça), além de componentes que atuem diretamente na transformação e transmissão do fluxo para os poços. Adicionalmente a este sistema, deve apresentar componentes auxiliares do processo (sistema de equilíbrio, Mancais, Selos, *Skid*, Motor e Comando) que não atua diretamente na compressão do fluido.

Considere-se a seguinte seqüência na elaboração da FTA:

3.2.3.1 Seleção do evento topo

O evento topo ou evento indesejado é aquele que na sua ocorrência influencia diretamente a produção de óleo através de injeção de água nos poços. Foi classificado como "**parada da bomba**" (Fig. 13) e sua diagramação lógica é:

Parada da bomba

3.2.3.2 Fatores contribuintes

Os fatores contribuintes (itens) são os motivadores para que o evento indesejado ocorra. São provenientes da Árvore Funcional do FMEA e foram colocados em série, numa mesma linha, representando a hipótese de que se algum item falhar, o equipamento pára.

A referida hipótese baseia-se na causa provável que levará ao evento topo. Porém, tal causa está admitindo que apenas um item possa falhar, a efeito de

demonstração da técnica FTA, embora outras simulações sejam permitidas, cabendo ao usuário a análise da melhor configuração lógica.

Logo, a configuração lógica antes da ocorrência do evento é a "OU". Significa que os eventos são excludentes entre si:

OU

Os itens motivadores estão representados por configuração lógica. Exemplo:

Para este experimento, a análise é somente tratada com *status* de item, que pode falhar sendo a causa provável do evento indesejado.

3.2.3.3 Dados quantitativos

As informações sobre dados quantitativos (MTTF, MTTR e MTBF) foram obtidas de banco de dados de registros históricos de falhas no Oreda. Contudo, nem todos os itens possuem dados de taxas de falhas no OREDA, mas devem fazer parte do estudo por serem componentes importantes no sistema. Desse modo, o valor para o cálculo da Probabilidade de Ocorrência para estes itens será 0 (zero). Futuramente, os dados podem ser resgatados de banco de dados próprio e inseridos no estudo, reforçando mais e mais a confiabilidade da análise.

3.2.3.4 Cálculo da Probabilidade de Ocorrência

O cálculo da Probabilidade de Ocorrência será feito com auxílio do *Software* BlockSim da *Relisoft* do Brasil .

Este aplicativo transforma uma FTA em Diagrama de Bloco, facilitando o entendimento e os cálculos, pois nesta configuração é possível inserir os dados quantitativos (Fig. 13).

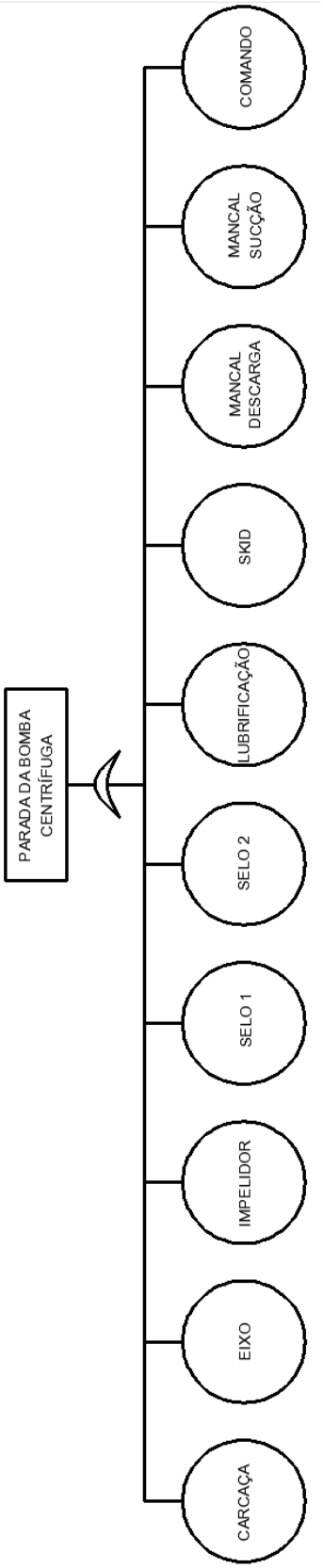


Figura 13 - Diagrama de árvore de falhas da bomba centrífuga.

3.3 CICLO DE VIDA DO EQUIPAMENTO

Tal como apresentado no capítulo introdutório serão analisadas dois cenários para utilização da técnica.

3.3.1 Primeiro cenário: sem MC

Esse cenário considera que a bomba centrífuga atenda a toda a campanha esperada da estação de injeção de água produzida. Ou seja, espera que o equipamento não quebre durante todo o período de funcionamento da estação. Pois, se o equipamento quebrar, haverá parada de produção que só voltará a acontecer após a troca da bomba.

3.3.1.1 Campanha de uma estação de injeção d`água

Se dá em função do tempo para saturação do reservatório. Em outras palavras: até que todo óleo possível de ser extraído pelo metódo de injeção d´água se esgote.

Foi definido que o tempo para este aconteciemento seja de 5 anos, a título experimental.

3.3.2 Segundo cenário: com MC

Essa segunda situação considera que há pelo menos MC durante todo o período de funcionamento da estação. Significa dizer que na falha do equipamento haverá reparo da bomba para retono de produção.

3.3.2.1 MC

Este tipo de intervenção prevê ações de reparo com objetivo de repor ao estado normal de funcionamento cada vez que o equipamento parar por falha.

O tempo de reparo foi de 15 dias, levando-se em consideração os aspectos de: desmontagem e montagem, logística de transporte e peças sobressalentes.

3.4 USO DO SOFTWARE BLOCKSIM

No BlockSim pode-se usar Diagramas de Árvore de Falhas, Diagramas de Blocos de Confiabilidade ou combinações de ambos dentro do mesmo projeto.

Pode-se converter automaticamente uma Árvore de Falhas em um Diagrama de Bloco de Confiabilidade,ou vice e versa, conforme figura 14:

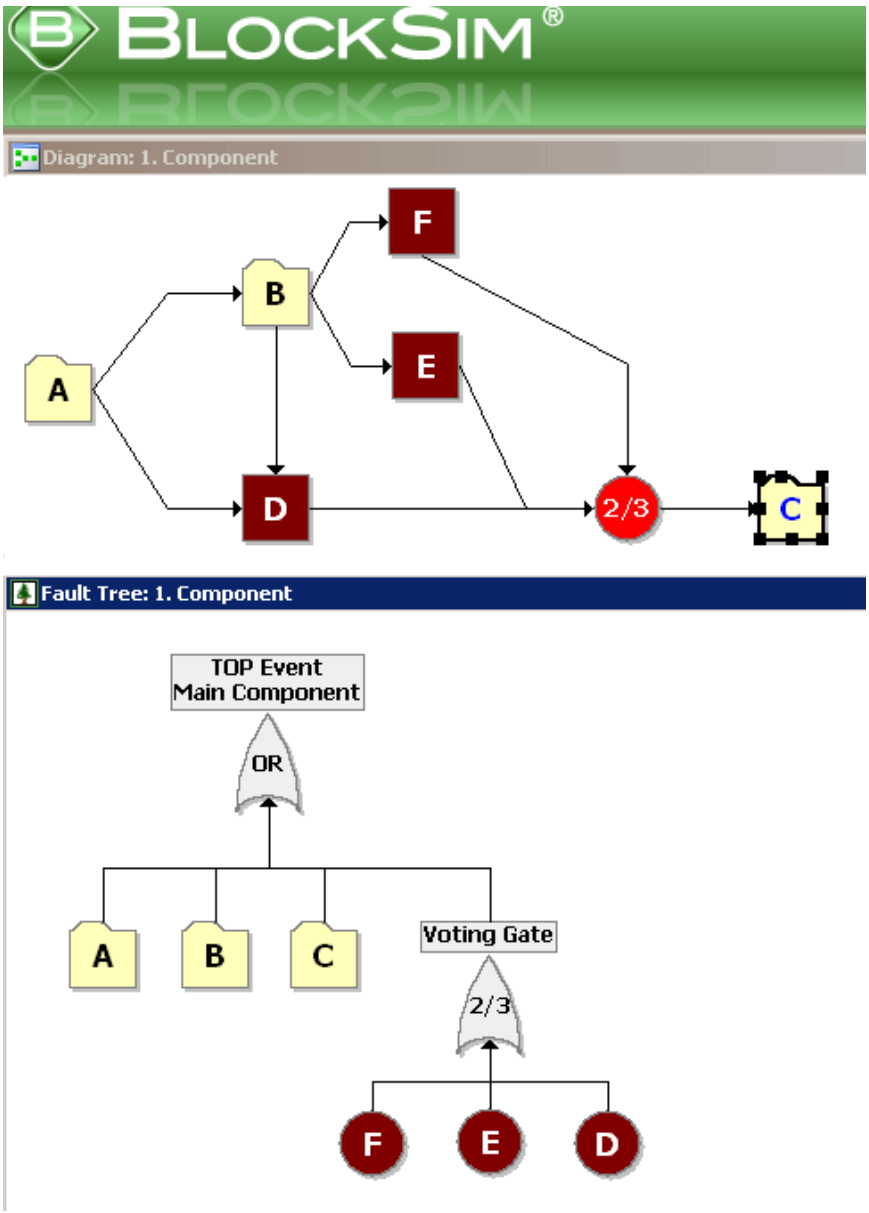


Figura 14 - Mudança de RDB para FTA

Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

3.4.1 Criando um bloco ou porta lógica no BlockSim

Os blocos no BlockSim definem as características de confiabilidade dos componentes do sistema, que serão utilizadas para criar seu diagrama. O próximo passo é criar um novo bloco no diagrama (Fig. 15), que servirá de modelo para os blocos a serem utilizados em seu RDB e provenientes da ávore funcional do FTA.

Para adicionar um bloco ao diagrama, deve-se clicar no ícone "adicionar novo bloco" na barra de ferramentas ou selecionar "adicionar bloco" no menu *diagram*. Um duplo clique no novo bloco criado e a janela "propriedades do bloco" aparecerá. Define-se, para este novo bloco, as características de vida do componente. Na caixa "nome", digita-se o nome do primeiro bloco como o demonstrado na figura 15

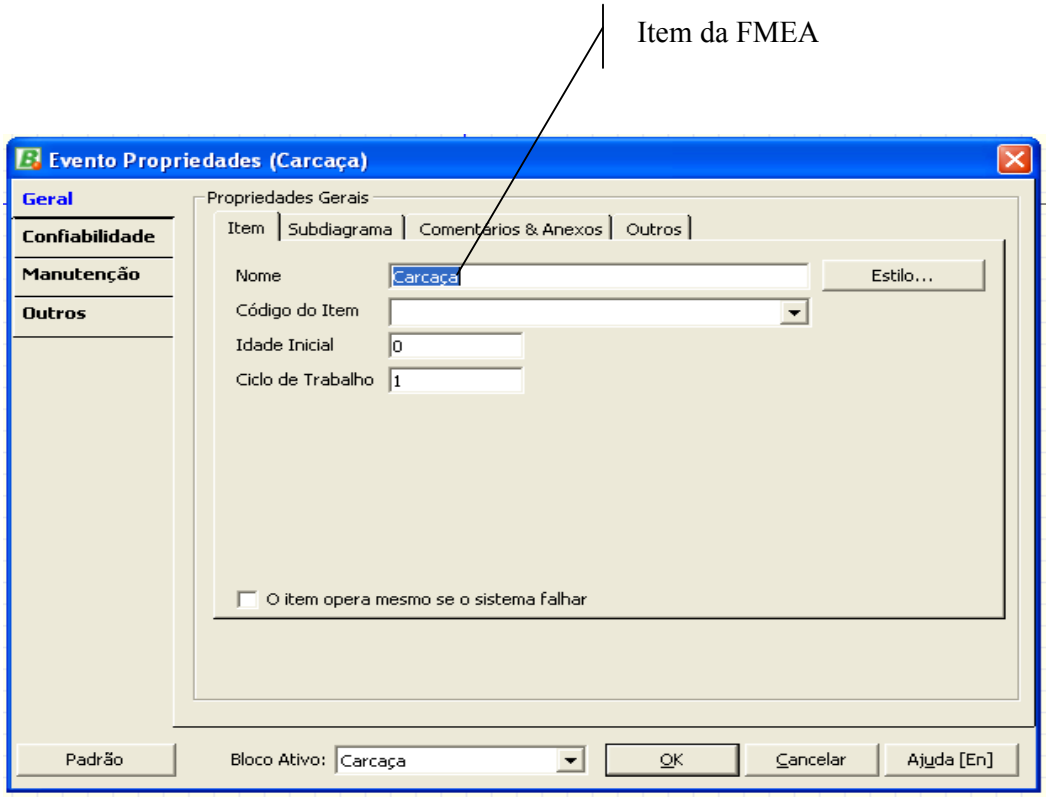


Figura 15 - Propriedade do item: nome do bloco.

Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

Clica-se na pasta Confiabilidade para inserir as propriedades de confiabilidade do primeiro bloco (Fig. 16).

A opção "O bloco pode falhar" deve estar selecionada para indicar que o componente pode falhar. Caso contrário, a confiabilidade do bloco em todos os tempos é considerada 1 ou 100% e as outras opções da página falhas estarão indisponíveis.

O usuário deve verificar se a opção "Confiabilidade estática" não está selecionada. Esta opção selecionada vai indicar que a distribuição de falhas, para o componente, não é dependente do tempo. Se a opção for selecionada, uma caixa de entrada irá aparecer, onde pode-se digitar a Confiabilidade do componente em um ponto fixo no tempo, e as outras opções de páginas falhas estarão indisponíveis.

Seleciona-se a distribuição exponencial, conforme a figura 16, e observa-se que as caixas de entrada à direita se alteram para representar os parâmetros requeridos, da distribuição selecionada.

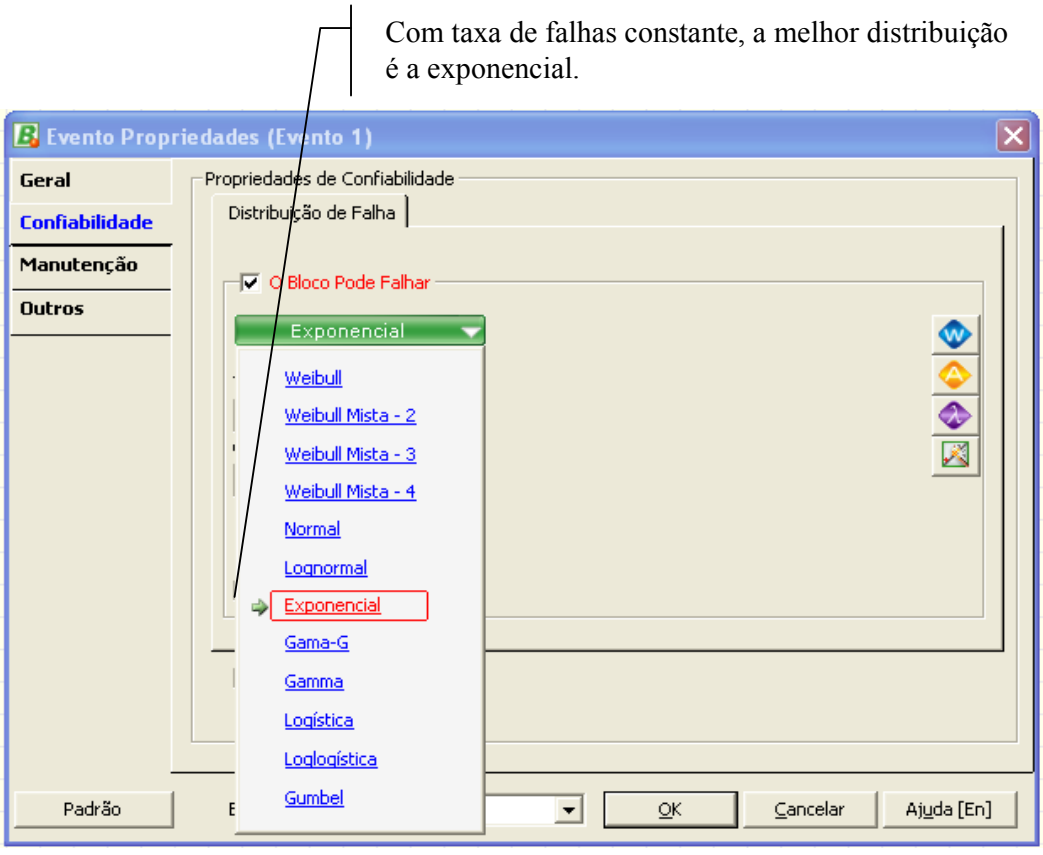


Figura 16 - Escolha do parâmetro de distribuição: Exponencial

Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

Para isso calcula-se o **MTTF** para cada bloco de acordo com a fórmula:

MTTF = 1/ λ , onde **λ** são as taxas de falhas.

A análise da bomba centrífuga levou em consideração taxas de falhas constantes, ou seja, o equipamento encontra-se na fase de vida útil e as taxas são aquelas registrados no livro do Oreda (Quadro 5). Os resultado dos cálculos das taxas de falhas dos itens provenientes da FTA estão representados no quadro 6.

Nota-se que os itens sistema de equilíbrio, Mancal, *Skid*, Comando e Motor, não têm valores no quadro 5, ou seja, não há registro histórico no Oreda para bomba centrífuga, daí os valores do MTTF serem 0 (zero).

Item	QBR	VAP	ATP	RND	VZU	ATP	DEF	RUI	VIB	MAN	ERR	PAR	OUT	Total
Carcaça	0,41	0,96	0,14	-	0,14	-	0,55	-	-	-	-	-	-	2,19
Eixo	-	-	-	0,14	0,18	-	0,15	0,27	0,11	-	-	-	-	0,84
Disco de equilíbrio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selo	0,14	6,09		-	12,59	-	0,41	0,07	-	0,14	0,14	0,21	0,41	21,34
Skid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Impelidor	-	-	-	-	0,05	-	0,21	-	0,18	-	-	-	-	0,43
Mancal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Comando	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 5 – Resumo das taxas de falhas (λ)

Fonte: OREDA , SINTEF 2009

Item	λ(t)- Total	MTTF (h)
Carcaça	2,19	456 621,00
Eixo	0,84	1.19 0476,19
Disco de equilíbrio	0	0
Selo 1	21,34	46. 860,36
Selo 2	21,34	46. 860,36
Skid	0	0
Impelidor	0,43	2.255 581,40
Mancal	0	0
Comando	0	0
Motor	0	0

Quadro 6 - Resultado dos cálculos do MTTF

3.4.2 Parâmetros de operação, manutenção e controle para simulação no BlockSim.

O **primeiro cenário** a ser simulado no *software* BlockSim é o sem manutenção. Os dados para alimentação dos *softwares* são:

- Dados para simulação;
- Dados para confiabilidade;
- Dados para manutenção.

3.4.2.1 Dados para simulação

O tempo esperado de vida do equipamento, cinco anos (43.800 h), é colocado no campo **"tempo final**" na tela Simulação da Mantenabilidade / Disponibilidade. A quantidade de simulações é fixa em 10 mil vezes, como se tem a seguir:

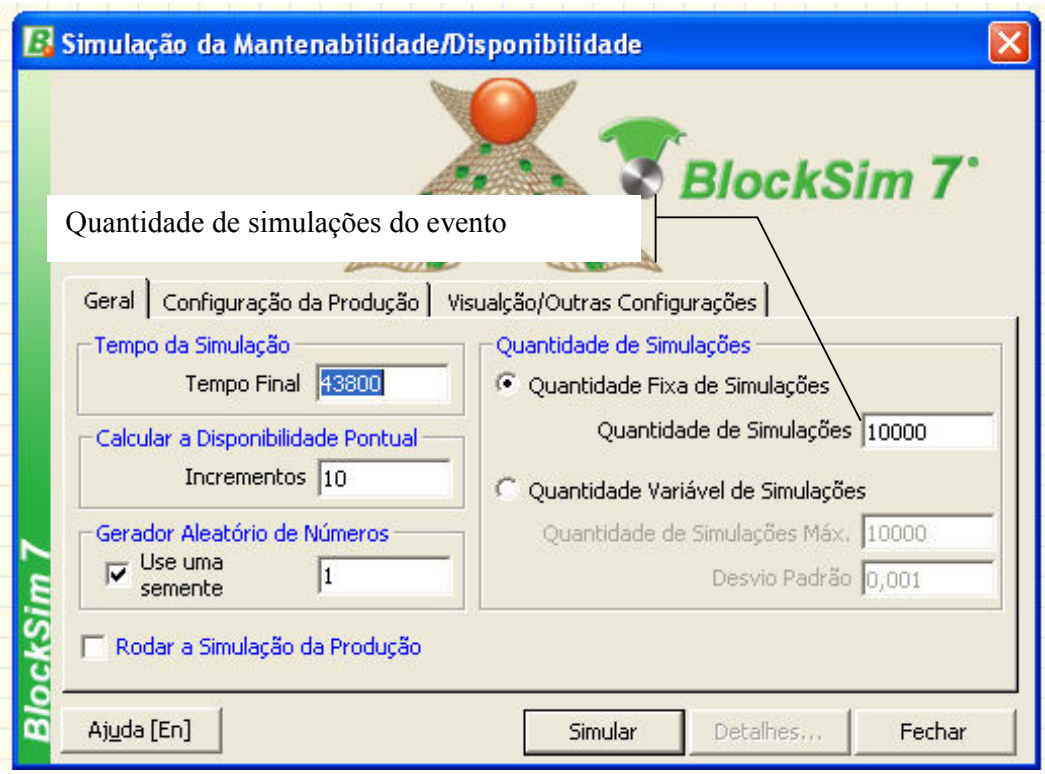


Figura 17 - Entrada de dados, parâmetros para simulação da confiabilidade no FTA

Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

3.4.2.2 Dados para confiabilidade

Preenche-se o campo "o bloco pode falhar", pois indica que há probabilidade de falhas durante a campanha.

Com os dados de MTTF do item Carcaça, preenche-se o campo "Tempo Médio" e repete-se esta operação para os outros itens da Árvore Funcional do equipamento, conforme a figura 18:

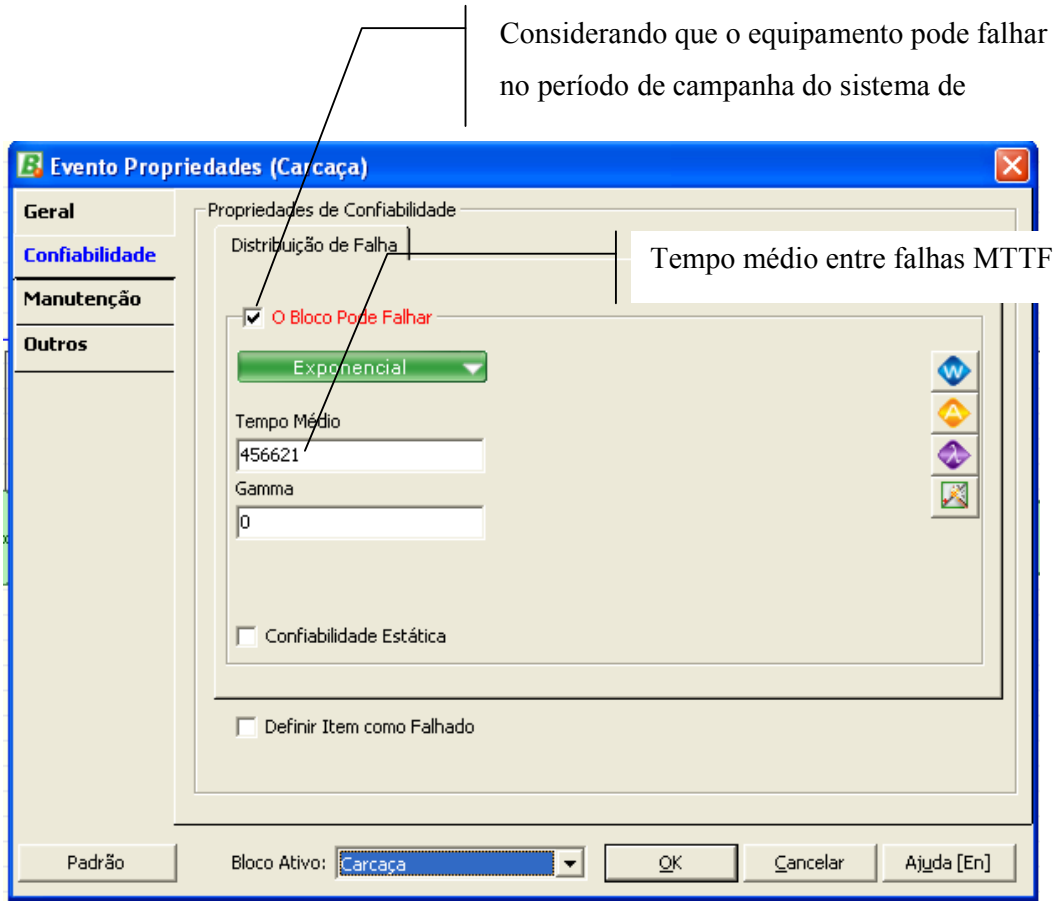


Figura 18 - Entrada de dados, parâmetros de confiabilidade 1º e 2º cenários
Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

3.4.2.3 Dados para manutenção

O campo "pode ser reparado corretivamente" deve ficar em branco, indicando que não haverá manutenção no equipamento em caso de falha (fig. 19).

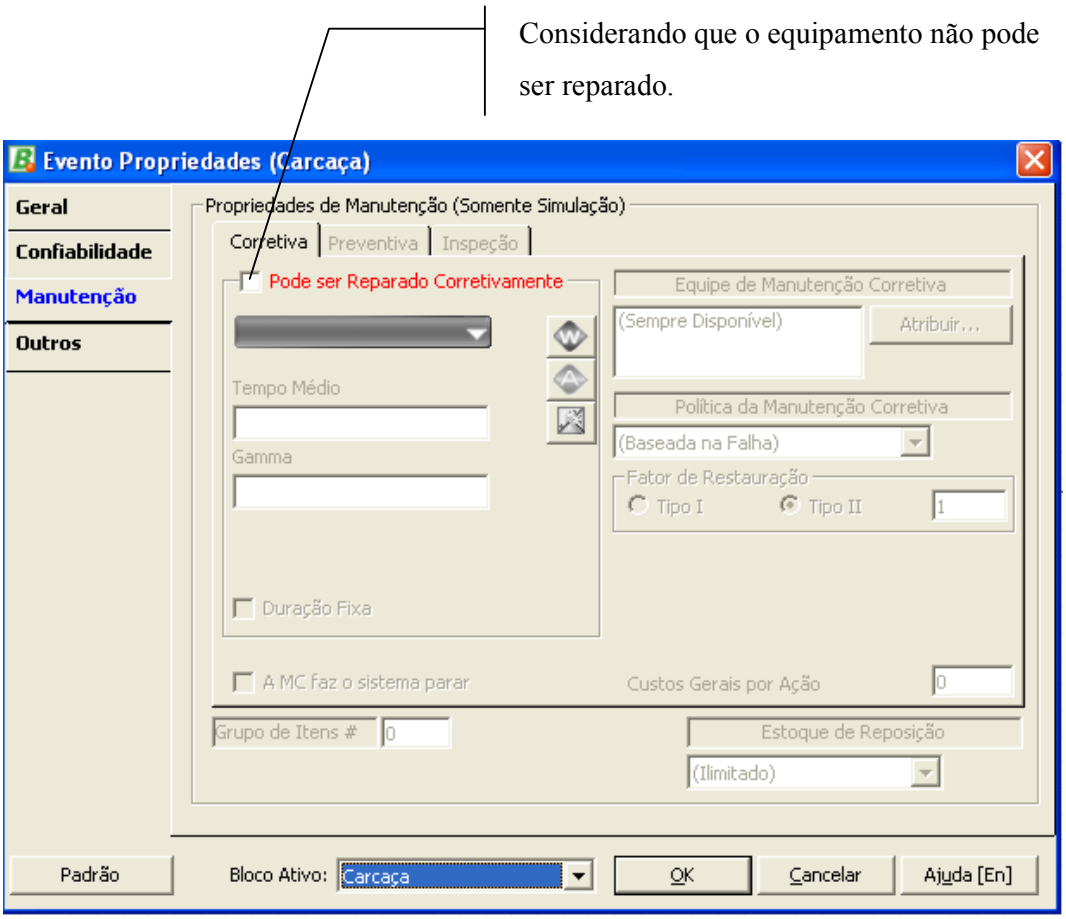


Figura 19 - Entrada de dados, parâmetros de Manutenção 1º Cenário

Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

O **segundo cenário** a ser simulado no *software* BlockSim é o com MC. Os dados para alimentação do *software* são:

Simulação

Tempo esperado de vida do equipamento, cinco anos (43.800 h). Este é o mesmo do primeiro cenário e é colocado no campo **"tempo final**" na tela Simulação da Mantenabilidade / Disponibilidade, conforme já foi mostrado. A quantidade de simulações também foi a mesma, fixa em 10 mil vezes (Fig. 17).

Confiabilidade, repete-se a mesma operação do primeiro cenário.

Manutenção, o campo "pode ser reparado corretivamente" deve ser preenchido indicando que haverá MC no equipamento em caso de falha.

O tempo médio para reparo é de 15 dias: 360 horas. Esta é uma referência de campo de petróleo *on shore* (Apêndice A p.145).

A referência da literatura é de aproximadamente seis dias (Oreda, 2009, p. 148).

Figura 20 - Entrada de dados, parâmetros de Manutenção do 2º Cenário.

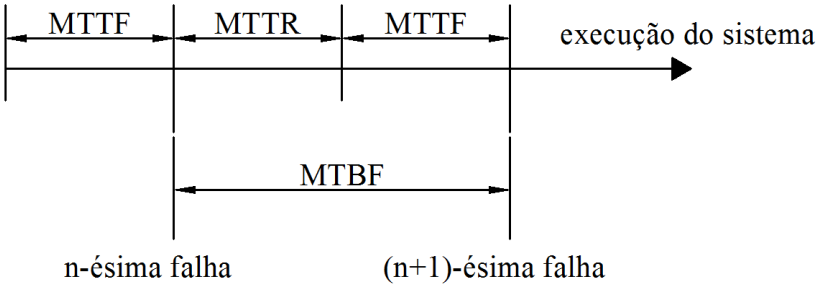
Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

3.4.3 Cálculo da confiabilidade - C

A confiabilidade do sistema é o produto de todas as partes que o compõem.

C Sistema =+ C Carcaça**.** C Eixo. C Impelidor**.** C Selo 1.C Skid**.** C Mancal C Descarga**.** C Mancal Sucção**.** C COMANDO**.** C Selo 2**.** C Lubrificação

3.4.4 Cálculo da dispinibilidade média e mantenabilidade – D



Métrica de disponibilidade e mantenabilidade

• ***MTTF: Mean-Time to Failure*** (Tempo Médio até a Falha)

• ***MTTR: Mean-Time to Repair*** (Tempo Médio para Reparo)

• ***MTBF: Mean-Time Between Failure*** (Tempo Médio entre Falhas)

MTBF = MTTF + MTTR

Portanto:

Disponibilidade **(D)** é a fração do tempo em que o componente (ou sistema) está operacional.

A Mantenabilidade é o tempo que se destina à realização deste reparo: ***MTTR***

D = MTTF/MTBF

3.4.5 Probabilidade de falhas F(f)

A probabilidade de falhas é calculada em função da previsão de falhas pela seguinte fórmula:

$$F(t) = 1 - C(t)$$

Quantidade Esperada de Falhas – F:

F Sistema = +F Carcaça+ F Eixo+ F Impelidor +F Selo.2+F Skid + F Manca . 2+F COMANDO+ F Motor + F Skid

3.4.6 Criticidade de falha

A *Reliasoft* desenvolveu dois índices:

(1) Índice *ReliaSoft* de criticidade de falhas (RS FCI, em inglês *ReliaSoft Failure Cricality Index*).

Este índice serve para mensurar a criticidade da falha, é uma medida relativa referente ao número de falhas do sistema causado pelo componente em análise, ou melhor, é a porcentagem de vezes em que o componente causou falha no sistema.

$$\text{RS FCI} = \frac{\text{Número de Falhas do Sistema Causadas pelo Componente/Item}}{\text{Número Total de Falhas do Sistema}}$$

(2) Índice ReliaSoft de criticidade de falhas com paradas do equipamento (RS DECI, do inglês *ReliaSoft Downing Event Criticality Index*).

Este índice serve para mensurar a criticidade da falha e de eventos que geram paradas. É uma medida relativa referente ao número de falhas e eventos que ocasionam paradas no sistema causadas pelo componente em análise, ou seja, a porcentagem de vezes em que o componente causou falha ou parada no sistema devido às falhas deste componente e outros eventos de parada com inspeções, MP's, etc.

$$\text{RS DECI} = \frac{\text{Nº de falhas do sist. (comp./item)} + \text{Nº de paradas do sist.(eventos de paradas comp./item)}}{\text{Número total de falhas e paradas do sistema}}$$

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

Capítulo 4

Neste capítulo serão tratados e discutidos os resultados obtidos na simulação dos dois cenários propostos para avaliação da vida do equipamento:

Sem Manutenção e com Manutenção corretiva.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FMEA

O resultado da FMEA da bomba centrífuga foi obtido a partir da discussão, em reunião, com um grupo multidisciplinar de especialistas formado por técnico de manutenção; técnicos instrumentistas; engenheiros de equipamentos e consultores externos (fabricante da Bomba Centrífuga).

As premissas para o debate sobre as condições operacionais, como: meios de detecção de falhas existentes, monitoração à distância, sensores, alarmes; logística de manutenção, deslocamento de pessoal, transporte; capacidade de reparo da oficina; nível técnico da mão-de-obra e sobressalentes; levaram em consideração uma estação de injeção d'água da Petrobras localizada em Mossoró na localidade do Canto do Amaro no RN.

A opinião de cada profissional nem sempre converge para um mesmo resultado. Já a figura de um coordenador é de fundamental importância para mediação do debate e negociação do consenso.

Quanto aos itens selecionados para a análise dos modos de falhas e seus efeitos, não houve dificuldade de identificação. Todos concordaram que trata-se de itens amplamente conhecidos e alguns possuem histórico de falhas registrados em banco de dados e/ou em literatura específica sobre o assunto como Oreda, por exemplo.

Os itens para análise da FMEA, conforme planilha 2 foram:

4.1.1 Carcaça

A carcaça tem a sua descrição funcional principal: conter o fluido comprimido.

4.1.1.1 Motivo

O motivo o qual levou este item a ser selecionado para análise de confiabilidade pelos especialistas foi que a sua falha pode provocar a parada do equipamento e risco grave de acidente devido a alta pressão de trabalho da bomba. (Ver apêndice A p, 145).

4.1.1.2 Modo de falha

Não conter o fluido comprimido.

4.1.1.2.1 Efeitos potenciais da falha

Na ocorrência do evento ocorre a parada do equipamento.

4.1.1.3 Mecanismo de dano e falhas

Dos mecanismos potenciais de falha ou causa provável, foram selecionados os que possuem histórico conhecidos pelos especialistas: rachadura e degradação.

Rachadura é uma causa provável que considera fatores como, por exemplo, erro de projeto (fundição, tratamento térmico, etc) e agentes externos (impacto, queda, etc).

A degradação é proveniente da ação do tempo e da atmosfera marítima do local.

4.1.1.4 Severidade do evento por rachadura ou degradação

A severidade do evento por rachadura e degradação levou em conta a possibilidade de vazamento do fluido à alta pressão (Ver Tabela B2 do Anexo A, p. 153).

- Categoria da Severidade 5 (cinco)

Ainda de acordo com a tabela anterior, tem-se denominação: "**catastrófica"**, devido à alta pressão de trabalho da bomba. (Ver apêndice A, p. 145).

- Efeito sobre as pessoas

Considera-se que na ocorrência desse evento, segundo essa categoria, ocorra acidente com letalidade ou incapacidade total as pessoas.

- Efeito sobre o patrimônio

Os custos com danos materiais serão maiores que o custo para aquisição de um novo equipamento, nessa categoria (Ver Tabela B2 do Anexo, p. 153).

- Efeito sobre o Meio Ambiente

A norma N-2781 considera que seja muito agressivo o impacto da ocorrência desse evento, conforme tabela B2 do Anexo A, p. 153. Entretanto, o fluido comprimido pela Bomba é previamente tratado em uma estação de tratamento de efluentes, o que reduz o nível de contaminação das áreas no entorno da estação. Aliás, as estações são providas de um sistema de contenção e escoamento de fluído (Ver Apêndice A, p. 145).

- Efeito sobre a operação

O tempo para reparo do equipamento ou reposição da operação deve ser de 30 dias, devido a dificuldade de aquisição no mercado ou complexidade do reparo na carcaça.

4.1.1.5 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas de rachadura ou degradação foram obtidas través de banco de dados do Oreda, registros históricos de falhas de banco de dados próprios e a partir do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

De acordo com a Tabela B1 do Anexo A, p. 152, a categoria de freqüência é **2(dois)**, denominada: "**Remota".** Nessa categoria não é esperado que ocorra este evento durante a vida útil do equipamento.

4.1.1.6 Criticidade

Na avaliação dos especialistas, o item carcaça com seus mecanismos potenciais de falhas (rachadura ou degradação), foram considerados de alto potencial. Significa que a causa deste evento provocará conseqüências intoleráveis, seja para SMS e/ou para operação/manutenção.

- Categoria da Criticidade

"A", segundo tabela B5 do anexo A Pg. (155), é **"INTOLERÁVEL".** Isto significa que medidas mais rigorosas devem ser tomadas para mitigar e/ou eliminar o risco de ocorrência desse evento.

- Medidas preventivas

Nesta categoria é de fundamental importância que itens como:

- Projeto de fabricação: erros de cálculos de dimensionamento, fabricação deficiente (fundição); etc;
- Manutenção: Erro de Montagem; impactos externos; quedas; etc
- Vibração: Provenientes dos equipamentos da instalação;
- Projeto de instalação: Tubulações e acessórios instalados incorretamente;
- Seja analisados previamente e estejam contemplados dentro de uma política de manutenção baseada em confiabilidade.
- Também, medidas de SMS devem ser implementadas como:
- Aviso do risco da área: Placas; Mapas de ricos; etc.;
- Demarcação de área; área de circulação.
- Barreiras físicas: Grades; Cabines; etc.

4.1.1.7 Detecção

Rachaduras, trincas, fissuras não são facilmente detectadas, no entanto, com a ocorrência do vazamento do fluído torna-se visível podendo ser percebido pela operação de imediato, considerando que na instalação tenha um sistema de câmeras ou uma rotina de verificação dos operadores (ronda).

- Categoria da Detecção

Conforme tabela B3 do anexo A da Pg. (154), a categoria é 3 (três), denominado: "**Baixo**". Ou seja, não possui recursos de detecção instalados no equipamento, sendo percebido somente por sentidos humanos.

4.1.1.8 NPR

Foi visto na metodologia que o Nível de Proteção e Risco é o produto entre a severidade, Freqüência e a Detecção, sendo assim o NPR para o Item **Carcaça** foi **30 (trinta).** Este índice coloca-a na **terceira posição** do ranking de criticidade, isto significa que a ocorrência do evento indesejado "parada do equipamento" causado por Rachadura ou Degradação é de alto potencial de risco, vide quadro 8.

4.1.2 Eixo

Conforme definido na descrição funcional: A sua função é transmitir força para compressão do fluído.

4.1.2.1 Motivo

O motivo da escolha deste item para análise é porque sua falha pode provocar a parada do equipamento e possui tempo superior a 180 dias para aquisição ou reparo.

4.1.2.2 Modo de falha

Não transmitir força para o sistema de compressão.

4.1.2.3 Efeito potencial da falha

O equipamento para na ocorrência do evento.

4.1.2.4 Mecanismo de dano e falhas

Os mecanismos potenciais de falha ou Causa provável, foram selecionados os que possuem histórico conhecidos pelos especialistas: Quebra do equipamento.

A Quebra pode ser de origem: Erro do projeto (dimensionamento); Construção (fundição, tratamento térmico, etc.); Estrutural (fadiga; cisalhamento, etc.)

4.1.2.5 Severidade do evento por Quebra

A severidade de uma falha do eixo por quebra, conforme tabela B2 do Anexo A, Pg. (153), atinge mais o equipamento do que as pessoas devido à natureza construtiva da Bomba.

- Categoria da Severidade

A Categoria da Severidade para este tipo de falha é **3 (três),** vide tabela B2 do Anexo A Pg. (153); Denominação: "**Moderada**", pois a sua falha causará só danos materiais.

- Efeito sobre as pessoas

A norma N-2781, considera que a ocorrência desse evento, segundo essa categoria, ocorra acidente com afastamento superior a 15 dias.

- Efeito sobre o patrimônio

A norma N-2781, considera que na ocorrência desse evento, segundo essa categoria, os custos com danos matérias são "**moderados"** com relação ao custo para aquisição de um novo Eixo.

- Efeito sobre o Meio Ambiente

O impacto seja "**considerável**", conforme tabela B2 do Anexo A Pg. (153), atingido, somente área interna no entorno da estação.

- Efeito sobre a Operação

O tempo para reparo do equipamento e reposição da operação seja de **7 dias**, devido a dificuldade de aquisição no mercado de um Eixo para Bomba Centrífuga, pois não se tem esta peça em estoque (sobressalente).

4.1.2.6 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas de Quebra foram obtidas através de do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

A categoria de freqüência, de acordo com a tabela B1 do Anexo A, Pg. (152), é **2(dois)**, denominada : "**Remota"**

Nessa categoria não é esperado que evento ocorra durante a vida útil do equipamento.

4.1.2.7 Criticidade

Na avaliação dos especialistas o item **Eixo**, com seu mecanismo potencial de falha: Quebra**,** foi considerado **"controlável"** isto significa que a causa deste evento provocará conseqüência, somente, para operação/Manutenção.

- Categoria da Criticidade

A categoria de criticidade é **"C",** segundo tabela B5 do Anexo A Pg. (155), é denominada de **"TOLERÁVEL".** Isto significa que só medidas de monitoração devem ser tomadas.

- Medidas de Monitoração

Algumas sugestões para monitoração podem ser adotadas na política de manutenção da empresa:

- Projeto de fabricação: Inspeção de fabricação obrigatória.
- Manutenção: Inspeção com líquido penetrante.

4.1.2.8 Detecção

Defeitos de fabricação, Trincas, fissuras, não são facilmente detectadas, no entanto, com a ocorrência da falha verifica-se pela falta de compressão do fluído e

parada da injeção de água podendo ser percebido pela operação de imediato, considerando que na instalação tenha um sistema supervisório[1] de operação.

Este sistema supervisório mostra na tela do computador da sala do operador as condições e parâmetros do sistema de injeção de água, ver Apêndice A Pg. (145).

- Categoria da Detecção

Conforme tabela B3 do Anexo da Pg. (154), a categoria é **3 (três)**, denominado: "**Baixo**". Ou seja, não possui recursos de detecção instalados no equipamento, sendo percebido somente por sentidos humanos.

4.1.2.9 NPR

O Item "**Eixo**" teve resultado de NPR igual a **18(dezoito),** vide planilha 2 Pg. (111), isto significa que a ocorrência do evento indesejado: parada do equipamento, causado por **Quebra** é de médio potencial de risco, colocando-o como **quinto** colocado no ranking dos itens críticos, vide quadro 8.

A justificativa é que mesmo com a quebra do eixo com a parada da bomba o mesmo será contido dentro da voluta, isto impossibilita um acidente mais grave a pessoas.

4.1.3 Disco de Equilíbrio

A sua descrição funcional é: Manter o sistema de compressão em equilíbrio hidrodinâmico.

O equilíbrio hidrodinâmico[2] é conseguido com o balanceamento do dispositivo de equilíbrio que serve para compensar o empuxo axial que atua em direção do lado da sucção.

[1] Supervisório: Sistema que executa a monitoração remota dos equipamentos.

[2] Equilíbrio hidrodinâmico: É o equilíbrio promovido pela força axial do fluído bombeado impedindo o contato entre os rotores e a carcaça, através de um disco fixado no eixo da bomba.

4.1.3.1 Motivo

A sua falha pode provocar a parada do equipamento e possui custo alto para reparos. Levando um tempo superior a 180 dias para aquisição de peças desse sistema, inclusive a sua falha pode levar a destruição total do conjunto: rotor, impelidores, difusores e voluta.

4.1.3.2 Modo de falha

Não manter o sistema de compressão em equilíbrio hidrodinâmico.

4.1.3.3 Efeito potencial da falha

Na ocorrência do evento, percebe-se a redução do rendimento da bomba e/ou parada do equipamento em casos mais graves.

4.1.3.4 Mecanismo de dano e falhas

Os mecanismos potenciais de falha ou "**Causa provável**", foram selecionados os que possuem histórico conhecidos pelos especialistas: Quebra e aumento da temperatura no corpo da bomba e mancais.

A Quebra pode ser de origem: Erro de Manutenção (montagem incorreta); contaminação (presença de partícula sólida na face do disco); Projeto (Erros na fabricação).

4.1.3.5 Severidade do evento por Quebra

A severidade da falha desse item esta associada a possibilidade da destruição total do conjunto compressor.

- Categoria da Severidade

4 (Quatro) vide tabela B2 do Anexo A Pg. (153); Denominação: "**Crítica**", pois a sua falha causará só danos materiais apesar de existir registro de ocorrência de destruição total dos internos, sem romper a voluta da bomba.

- Efeito sobre as pessoas

A norma N-2781, considera que a ocorrência desse evento, segundo essa categoria, o acidente provoque incapacitação parcial da pessoa afetada.

- Efeito sobre o patrimônio

A norma N-2781 considera os custos com danos matérias serem "**elevados"** com relação ao custo para aquisição de um novo sistema de equilíbrio.

- Efeito sobre o Meio Ambiente

O impacto seja "**grande magnitude**", conforme tabela B2 do Anexo A Pg. (153), atingido, além da área interna e áreas externas no entorno da estação.

- Efeito sobre a Operação

O tempo para reparo do equipamento reposição para a operação, segundo a norma N-2781 são **15 dias**.

A discussão foi sobre a dificuldade de aquisição no mercado desse item, pois não se tem esta peça em estoque (sobressalente).

4.1.3.6 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas de desequilíbrio do sistema hidrodinâmico e por alta temperatura, foram obtidas través do conhecimento de campo e consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

De acordo com a tabela B1 do Anexo A, Pg. (152), a categoria de freqüência é **4 (quatro),** denominado : "**Provável"**

Nessa categoria não é esperado que ocorra mais de uma vez na vida útil do equipamento.

4.1.3.6.1 Criticidade

Na avaliação dos especialistas o item **"Disco de Equilíbrio"**, com seu mecanismo potencial de falha: "**Quebra**", foi considerado alto potencial, isto significa que a causa deste evento provocará conseqüência para Operação; Manutenção e SMS.

- Categoria da Criticidade

"A", segundo tabela B5 do Anexo A Pg. (155), é **"INTOLERÁVEL".** Isto significa que medidas mais rigorosas devem ser tomadas para mitigar e/ou eliminar o risco de ocorrência desse evento.

- Medidas Preventivas

Algumas sugestões para mitigar ou eliminar a falha devem ser implementadas na política de manutenção da empresa, como:

- Inspeção no projeto de fabricação: para evitar erros de cálculos de dimensionamento, fabricação deficiente (usinagem do disco); etc;
- Manutenção: para evitar vibração, provenientes do desbalanceamento do disco; e erro de montagem, por falta de procedimento adequado.
- Medidas de SMS: como, aviso do risco dá área, placas de advertência; mapas de ricos; demarcação de área de circulação, barreiras físicas (Grades; Cabines; etc.)

4.1.3.7 Detecção

Defeitos de fabricação, Vibração e contaminação por partículas sólidas são detectáveis se houver: Inspeção de fabricação, monitoração por análise de vibração e inspeção periódica, respectivamente.

- Categoria da Detecção

Conforme tabela B3 do anexo A da Pg. (154), a categoria é **2 (dois)**, denominado: "**Moderada**", ou seja possui recursos para inspeção, este recurso esta relacionado á análise da vibração executada pela manutenção preditiva.

4.1.3.8 NPR

O NPR para o Item "**Disco de Equilíbrio**" foi **32 (trinta e dois),** vide planilha 2 Pg. (101), é o **primeiro no ranking**, vide quadro 8, isto significa que a ocorrência do evento indesejado: parada do equipamento, causado por quebra dos internos/ aumento de temperatura é considerado de alto potencial de risco.

A discussão para se chegar a esta conclusão foi por causa da alta freqüência desse incidente, que impacta diretamente na disponibilidade do equipamento para produção.

4.1.4 Selo Mecânico

O selo Mecânico tem descrição funcional: Conter o fluído de compressão da Bomba Centrífuga.

4.1.4.1 Motivo

O motivo para que este item componha os itens críticos da Bomba foi baseado na sua falha que pode provocar a parada do equipamento e, além disso, possui custo alto e o tempo para aquisição superior a 180 dias.

Sua falha provoca o vazamento da água de injeção em alta pressão, podendo causar acidentes graves a pessoas, ver Apêndice A Pg. (145).

4.1.4.2 Modo de falha

Não conter o fluído dentro da câmara de compressão da bomba.

4.1.4.2.1 Efeito potencial da falha

Na ocorrência do evento ocorre a parada do equipamento.

4.1.4.3 Mecanismo de dano e falhas

Os mecanismos potenciais de falha ou "**Causa provável**", foram selecionados os que possuem histórico conhecidos pelos especialistas: Contaminação por partículas sólidas e alta temperatura.

A Contaminação pode ser de origem da presença de partícula sólida no fluído de refrigeração do selo.

E alta temperatura pode ser proveniente de erro do projeto na escolha do plano de selagem ou por mudança de processo.

4.1.4.4 Severidade do evento por Quebra

A severidade da falha do selo no processo de compressão da bomba centrífuga esta mais relacionada a questão de disponibilidade do equipamento por causa do tempo de reparo desse item.

- Categoria da Severidade

A categoria de severidade da falha é **3 (três),** vide tabela B2 do Anexo A Pg. (153); Denominação: "**Moderada**", pois a sua falha é reparável e existem peças sobressalentes.

- Efeito sobre as pessoas

O feito sobre pessoas segundo essa categoria é o acidente com afastamento superior a 15 dias.

- Efeito sobre o patrimônio

Os danos ao Patrimônio são os custos com danos matérias são "**Moderados"** com relação ao custo para aquisição de um novo selo.

- Efeito sobre o Meio Ambiente

Os danos ao Meio ambiente na ocorrência desse tem impacto de "**magnitude considerável**", conforme tabela B2 do Anexo A Pg. (153), atingido ,somente a área interna da estação.

- Efeito sobre a Operação

A parada de produção devido a falha do selo considera o tempo para reparo do equipamento e reposição da operação que sejam de **7 dias**.

4.1.4.5 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas de Rachadura ou degradação foram obtidas través de banco de dados do OREDA e de registros históricos de falhas e do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

De acordo com a tabela B1 do Anexo A, Pg. (152), a categoria de freqüência é **5 (cinco),** denominado : "**Freqüente"**

Nessa categoria é esperado que ocorra várias vezes na vida útil do equipamento.

4.1.4.6 Criticidade

Na avaliação dos especialistas o item "**Selo"** com seus mecanismos potencial de falha: "**Contaminação por partículas sólidas e alta temperatura**", foi considerado alto potencial, isto significa que as causas deste evento provocarão conseqüências para Operação; Manutenção e SMS.

- Categoria da Criticidade

A categoria de criticidade segundo tabela B5 do Anexo A Pg. (155), é **"A"**, denominada de **"INTOLERÁVEL".** Isto significa que medidas mais rigorosas devem ser tomadas para mitigar e/ou eliminar o risco de ocorrência desse evento.

- Medidas Preventivas

Sugestões de medidas mitigadoras são de fundamental importância para evitar ou eliminar o risco de falha do selo mecânico.

Itens como:

- Inspeção no projeto de fabricação verificando plano de selagem;
- Manutenção preventiva com a monitoração por sensores ou com termo visor;
- Medidas de SMS.

Devem estar contemplados dentro de uma política de manutenção baseada em confiabilidade.

4.1.4.7 Detecção

Vazamento de fluído e aumento de temperatura são detectáveis por sistemas de monitoração, entretanto, a contaminação só e detectável com a desmontagem e inspeção.

- Categoria da Detecção

A categoria é **2 (dois)**, denominado: "**Moderada**", ou seja possui recursos para inspeção.

4.1.4.8 NPR

Para o Item "**Selo Mecâncico**" o NPR foi **30 (trinta),** vide planilha 2 Pg. (111), isto significa que a ocorrência do evento indesejado: parada do equipamento, causado pela contaminação por partículas sólidas e por alta temperatura no disco de equilíbrio é considerado de alto potencial de risco, como demonstrado no quadro 8, colocando-o como **segundo** no ranking dos itens mais críticos.

A freqüência desse vento foi o ponto de discussão para se chagar a esta conclusão.

4.1.5 Skid

A descrição funcional do Skid é a Fixação do conjunto Motor bomba.

4.1.5.1 Motivo

O Motivo pelo qual este item foi escolhido para compor os itens para estudo de confiabilidade foi porque a sua falha pode provocar vibração excessiva e conseqüentemente o mau funcionamento do conjunto Motor bomba.

4.1.5.2 Modo de falha

Não fixar o conjunto Motor bomba.

4.1.5.3 Efeito potencial da falha

Na ocorrência do evento, percebe-se o mau funcionamento do conjunto Motor Bomba.

4.1.5.4 Mecanismo de dano e falhas

O mecanismo potencial da falha ou "**Causa provável**", foi selecionado o que possui histórico conhecido pelos especialistas: **Vibração excessiva do Conjunto Motor Bomba**.

A Vibração pode ser de origem de: Erro de Manutenção (montagem incorreta); Erro de projeto de instalação (Tubulações, acessórios; tencionando o conjunto Skid/Motor Bomba).

4.1.5.5 Severidade do evento por Vibração

A severidade da falha por vibração excessiva foi analisada sob aspecto do nível de vibração, pois, dependendo dos efeitos da vibração no Skid, pode provocar o mau funcionamento do conjunto até a sua parada total.

- Categoria da Severidade

A categoria da Severidade, vide tabela B2 do Anexo A Pg. (153), é **1(um)** e tem a Denominação: "**Desprezível"**", pois a sua falha não causará danos relevantes e pode ser reparado rapidamente.

- Efeito sobre as pessoas

A norma N-2781,considera que a ocorrência desse evento, segundo essa categoria, provoque um acidente sem afastamento.

- Efeito sobre o patrimônio

A norma N-2781,considera que na ocorrência desse evento, segundo essa categoria, os custos com danos matérias serem "**desprezível"** com relação ao custo para aquisição de um novo sistema de equilíbrio.

- Efeito sobre o Meio Ambiente

A norma N-2781, considera que a ocorrência desse evento, segundo essa categoria, o impacto seja "**desprezível**", conforme tabela B2 do Anexo Pg. (153), atingido só, áreas internas da estação.

- Efeito sobre a Operação

Considera-se que na ocorrência desse evento, segundo essa categoria, o tempo para reparo do equipamento reposição da operação seja de algumas horas para reparo.

4.1.5.6 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas provenientes de vibração excessiva do conjunto motor bomba foram obtidas través do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

A categoria de freqüência é a **4 (quatro),** denominado : "**Provável",** de acordo com a tabela B1 do Anexo A, Pg. (152), nessa categoria é esperado que ocorra mais de uma vez na vida útil do equipamento.

4.1.5.7 Criticidade

Na avaliação dos especialistas o item "**Skid"**, com seu mecanismo potencial de falha: "**Vibração**" foi considerado baixo potencial, isto significa que a causa deste evento não provocará conseqüência para Operação; Manutenção e SMS, de imediato.

- Categoria da Criticidade

A categoria da Criticidade é a **"C",** e considerada **"TOLERÁVEL".** Isto significa que não há necessidade de medidas mais rigorosas apenas a monitoração da vibração é necessária.

- Medidas Preventivas

A pesar de ser considerada tolerável esta categoria é de fundamental importância que os itens como: Projeto instalação, evitando erro de montagem; manutenção, com monitoramento da vibração e medidas de SMS devem ser implementadas.

4.1.5.8 Detecção

A detecção da falha do equipamento no skid é perceptível através da monitoração, por análise de vibração através de instrumentos de medição; sentidos humanos (ruído e vibração).

- Categoria da Detecção

A categoria da detecção da falha é a **2 (dois)**, denominada de "**Moderada**", ou seja, possui recursos para inspeção, conforme tabela B3 do Anexo A Pg. (154).

4.1.5.9 NPR

Este Item "**Skid**" teve NPR **8 (oito),** vide planilha, significando que na ocorrência do evento indesejado: Mau funcionamento do equipamento, causado pela Vibração é considerado de baixo potencial de risco, ficando na 7ª colocação do ranking, como demonstrado no quadro 8.

O consenso para se chegar a este resultado foi a baixa gravidade desse evento nas instalações.

4.1.6 Impelidor

A descrição funcional do Impelidor é de pressurizar o fluído para injeção.

4.1.6.1 Motivo

A sua escolha como item crítico foi porque a falha neste equipamento pode provocar a parada do equipamento e risco grave de acidente devido a alta pressão de trabalho da bomba, ver apêndice A Pg. (145).

4.1.6.2 Modo de falha

Não pressurizar o fluído.

4.1.6.3 Efeito potenciais da falha

Na ocorrência do evento, ocorre a parada o equipamento.

4.1.6.4 Mecanismo de dano e falhas

Os mecanismos potenciais de falha ou Causa provável, foram selecionados os que possuem histórico conhecidos pelos especialistas: **Quebra e Cavitação**.

A Quebra é uma causa provável, considerando os fatores como, por exemplo, erro de projeto de fabricação (fundição, tratamento térmico, etc.); agentes internos carregados pelo fluído (objetos, pedras, etc.) e deslocamento axial do rotor (devido à falha no equilíbrio hidrodinâmico).

A cavitação é provocada pela presença de bolhas gás no interior do líquido bombeado.

4.1.6.5 Severidade do evento por Rachadura ou Degradação

A análise da severidade por Quebra e/ou Cavitação no Impelidor, foi vista pelo lado da segurança as pessoas.

- Categoria da Severidade

A categoria da Severidade **foi 5 (cinco),** vide tabela B2 do Anexo A Pg. (153); Denominação: "**Catastrófica"**, devido a alta pressão de trabalho da bomba, vide Apêndice A Pg. (145).

- Efeito sobre as pessoas

A norma N-2781, considera que a ocorrência desse evento, segundo essa categoria, ocorra acidente com potencial para incapacitação total definitiva ou fatalidade das pessoas.

- Efeito sobre o patrimônio

O efeito sobre o patrimônio, segundo essa categoria, são custos com danos matérias e considerados "**elevados**" com relação ao custo para aquisição de um novo equipamento, segundo a norma N-2781.

- Efeito sobre o Meio Ambiente

O efeito sobre o meio ambiente, segundo essa categoria, considera que o impacto seja muito agressivo, conforme tabela B2 do anexo A Pg. (153).

No entanto, o fluído comprimido pela Bomba é previamente tratado o que reduz o nível de contaminação das áreas no entorno da estação, inclusive, as estações são providas de um sistema de contenção e escoamento de fluído.

- Efeito sobre a Operação

O efeito sobre a operação considera que na ocorrência desse evento, segundo essa categoria, o tempo para reparo do equipamento reposição da operação seja de 30 dias, devido à dificuldade de aquisição no mercado, complexidade do reparo e não ter sobressalente na empresa.

- Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas como **Quebra ou Cavitação**, foi obtida través de banco de dados do OREDA e de registros históricos de falhas e do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

A categoria de Freqüência é **3 (três),** denominado: "**Ocasional",** de acordo com a tabela B1 do anexo A, Pg. (152).

Nessa categoria não é esperado que ocorra pelo menos uma vez durante toda a vida útil do equipamento.

4.1.6.6 Criticidade

Na avaliação dos especialistas o item **Impelidor** com seus mecanismos potenciais de falhas: **Quebra e Cavitação**, foi considerada de alto potencial, isto significa que a causa deste evento provocará conseqüências **indesejáveis** para SMS, Operação e Manutenção.

- Categoria da Criticidade

A categoria de Criticidade **é "B",** e denominada de **"INDESEJÁVEL",** segundo tabela B5 do anexo A Pg. (155)**.**

Isto significa que medidas mais rigorosas devem ser tomadas para mitigar e/ou eliminar o risco de ocorrência desse evento.

- Medidas preventivas

A Aplicação de medidas preventivas, nesta categoria é de fundamental importância. Visto que itens como: Projeto de fabricação, com erros de cálculos de dimensionamento, fabricação deficiente (fundição); Manutenção, com erro de montagem; Projeto de instalação, com Filtros mal dimensionados ou Cavitação, provocado pelo acumulo de bolhas de gás no fluído.

Sejam analisados, durante a pré-operação.

A verificação desses itens deve ser contemplada dentro de uma política de manutenção baseada em confiabilidade.

4.1.6.7 Detecção

A detecção de trincas e fissuras no Impelidor não são facilmente identificadas ou percebidas, dependendo de uma inspeção mais detalhada.

No caso de quebra do impelidor, considerando que na instalação tenha um sistema monitoração, é possível perceber analisando parâmetros como:

- Baixo rendimento do equipando (equipamento fora do BEP);
- Queda da pressão do fluído a jusante da bomba;

- Categoria da Detecção

A categoria é **1 (um)** denominado: "**Alta**", Conforme a norma N-2781

Ou seja, possui recursos de monitoração instalados no equipamento como, por exemplo, indicador de pressão com alarme na tela do controle operacional da estaca, vide apêndice A Pg. (145).

4.1.6.8 NPR

O NPR do Item **Impelidor** foi **15 (Quinze)**, ficando na 6ª colocação no ranking, isto significa que a ocorrência do evento indesejado parada da Bomba Centrífuga causado por Cavitação ou Quebra é de Médio potencial de risco, como demonstrado no quadro 8.

Os especialistas consideraram, que mesmo havendo registros históricos de falhas registrados em literatura a probabilidade de um acidente com vítima é remota devido à proteção da carcaça onde se encontra abrigado este item.

4.1.7 Mancal

Conforme definido na descrição funcional: Suportar o eixo da Bomba Centrífuga.

4.1.7.1 Motivo

O motivo para que este item fosse escolhido como um dos críticos no sistema Bomba Centrífuga é que a sua falha provoca a parada imediata do equipamento.

4.1.7.2 Modo de falha

O modo de falha funcional é não suportar o Eixo da Bomba centrífuga.

4.1.7.3 Efeito potencial da falha

O efeito da falha na ocorrência do evento é a parada do equipamento.

4.1.7.4 Mecanismo de dano e falhas

O mecanismo potencial de falha ou Causa provável, foi selecionado o que possui histórico mais conhecido pelos especialistas: **Aquecimento**.

O aumento do aquecimento do Mancal é uma causa provável de falha e pode-se considerar os seguintes eventos motivadores:

- Deslocamento do rotor (devido à falha no equilíbrio hidrodinâmico);
- Falha na lubrificação;
- Falha no rolamento.

4.1.7.5 Severidade do evento por Aquecimento do mancal

A severidade da falha por aquecimento do Mancal foi analisada levando-se em consideração a disponibilidade da bomba, visto que, sob o aspecto de segurança não haver registro de acidentes com este tipo de falha.

- Categoria da Severidade

A categoria da Severidade é **3 (três),** vide tabela B2 do Anexo A Pg. (153); Denominação: "**Moderada"**.

- Efeito sobre as pessoas

O efeito da falha sobre as pessoas, segundo essa categoria, é o acidente com potencial para afastamento das pessoas atingida por um período maior do que 15 dias, de acordo com a norma N-2781**,** vide tabela B2 do Anexo A Pg. (153).

- Efeito sobre o patrimônio

O feito sobre o patrimônio, segundo essa categoria, são custos com danos matérias considerados "**Moderados**" com relação ao custo para aquisição de um novo equipamento.

- Efeito sobre o Meio Ambiente

O efeito sobre o meio ambiente, segundo essa categoria, é impacto de **"magnitude considerável",** conforme tabela B2 do Anexo A Pg. (153).

No entanto, as estações são providas de um sistema de contenção e escoamento de fluído, vide Apêndice A Pg. (145).

- Efeito sobre a Operação

O efeito sobre a operação levou em conta o tempo para reparo do equipamento reposição da operação seja de 7 dias, conforme tabela B2 do Anexo A Pg. (153), devido a dificuldade de aquisição no mercado, complexidade do reparo e não ter sobressalente na empresa.

4.1.7.6 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas de devido a **alta temperatura no mancal**, foram obtidas través do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

A categoria de freqüência é **3 (três),** denominado : "**Ocasional",** de acordo com a tabela B1 do anexo A Pg. (152).

Nessa categoria é esperado que ocorra pelo menos uma vez durante toda a vida útil do equipamento.

4.1.7.7 Criticidade

Na avaliação dos especialistas o item **Mancal** com seus mecanismos potenciais de falhas: **Alta temperatura** foi considerada de alto potencial, isto significa que a causa deste evento provocará conseqüências **indesejáveis** para SMS, Operação e Manutenção.

- Categoria da Criticidade

A categoria de criticidade é a "B", segundo tabela B5 do Anexo A Pg. (155), é denominada de **"INDESEJÁVEL".**

Isto significa que medidas mais rigorosas devem ser tomadas para mitigar e/ou eliminar o risco de ocorrência desse evento.

- Medidas preventivas

A recomendação de medidas preventivas deve abranger itens como: Projeto de fabricação, para se evitar erros de cálculos de dimensionamento, fabricação deficiente (fundição); Manutenção, evitando-se erros de Montagem de rolamentos; implementando-se Monitoração da temperatura através de sensores e sistema supervisório. Estes devem ser contemplados dentro de uma política de manutenção baseada em confiabilidade.

4.1.7.8 Detecção

O aumento da temperatura nos mancais de sustentação do eixo da Bomba Centrífuga é facilmente detectadas, considerando que na Bomba tenha um sistema monitoração através de sensores ligados a um sistema supervisório, ver Apêndice A Pg. (145), ou através da manutenção preventiva ou detectiva acompanhando aumento da temperatura com uso de termo visores ou equipamentos de medição infravermelho.

- Categoria da Detecção

A categoria de detecção é **2 (dois),** denominado: "**Moderado**", conforme tabela B3 do Anexo Pg. (154), ou seja, possui recursos de detecção instalados no equipamento como, por exemplo, indicador de temperatura.

4.1.7.9 NPR

O NPR para o Item Impelidor foi **18(Dezoito)**, ficando na 5ª colocação do ranking, isto significa que a ocorrência do evento indesejado parada da Bomba Centrífuga causado por **Temperatura elevada** é de baixo potencial de risco. Esta percepção é observada segundo a avaliação dos especialistas e de registros da manutenção, quadro 8.

4.1.8 Comando

A descrição funcional Comando elétrico é: Controle e Proteção do Motor da Bomba Centrífuga.

4.1.8.1 Motivo

O motivo para que este equipamento ser escolhido e estar entre os itens para análise na FMEA e é que na ocorrência da falha o equipamento não funciona ou falha sob demanda.

4.1.8.2 Modo de falha

O modo de falha do item Comando do motor da Bomba Centrífuga é não Controlar e não Proteger o Motor da Bomba centrífuga.

4.1.8.3 Efeito potencial da falha

O efeito potencial da falha na ocorrência do evento é a parada do equipamento.

4.1.8.4 Mecanismo de dano e falhas

Os mecanismos potenciais de falha ou Causa provável, foi selecionado o que possui histórico conhecido pelos especialistas: **Falta de Eletricidade no Quadro de Comando.**

A Falta de Eletricidade no Quadro de Comando é uma causa provável de falha e pode-se considerar os seguintes eventos:

- Curto-circuito: devido à falha no sistema de proteção ou agentes externos como água.
- Falha nos circuitos eletrônicos: devido à oxidação dos contatos pela ação atmosférica.
- Descarga atmosférica

4.1.8.5 Severidade do evento por Falta de Eletricidade

A severidade da falha no Comando é analisada pelo lado da disponibilidade.

- Categoria da Severidade

A categoria de severidade é **3 (Três)** e tem denominação: "**Moderada"**, conforme tabela B2 do Anexo A Pg. (153).

- Efeito sobre as pessoas

O efeito sobre as pessoas, segundo essa categoria, é a ocorrência de acidente com potencial para afastamento das pessoas atingidas por um período maior do que 15 dias, segundo a norma N-2781.

- Efeito sobre o patrimônio

Os efeitos sobre o patrimônio são os custos com danos matérias serem considerados "**Moderados**" com relação ao custo para aquisição de um novo equipamento, tabela B2 do anexo A Pg. (153).

- Efeito sobre o Meio Ambiente

O efeito sobre o meio ambiente é o impacto de **"magnitude considerável",** conforme tabela B2 do Anexo Pg.(153), ou seja, apenas atingindo áreas internas da estação de injeção de água.

- Efeito sobre a Operação

O efeito sobre a operação considera o tempo para reparo do equipamento e reposição da operação seja de 7 dias, devido a dificuldade de aquisição no mercado, complexidade do reparo e não ter sobressalente na empresa.

4.1.8.6 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas devida a **Falta de Eletricidade no quadro de comando do Motor**, foram obtidas través do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

A categoria de freqüência é **2 (dois),** denominada de "**Remota",** de acordo com a tabela B1 do Anexo A Pg.(152). Nessa categoria não é esperado que ocorra a falha durante toda a vida útil do equipamento.

4.1.8.7 Criticidade

Na avaliação dos especialistas, a criticidade do item **Comando Elétrico** com seus mecanismos potenciais de falhas: **Falta de Eletricidade**, foi considerada de muito baixo potencial de risco, isto significa que a causa deste evento provocará conseqüências "**Toleráveis"** para SMS, Operação e Manutenção.

- Categoria da Criticidade

A categoria de criticidade é a **"C",** segundo tabela B5 do Anexo A Pg. (155), é denominada **"TOLERÁVEL".** Isto significa não há necessidade de medidas mais

rigorosas e que medidas de proteção e monitoração atendem para mitigar ou eliminarem o risco de ocorrência desse evento.

- Medidas preventivas

Recomenda-se que nesta categoria que itens como: Projeto de fabricação, possua sistemas de proteção e controle bem dimensionados; Projeto de Instalação, possua monitoração através de sistema supervisório e proteção contra descargas atmosféricas instalados.

4.1.8.8 Detecção

A falta de eletricidade para alimentação do Quadro de comando é facilmente detectadas, considerando que na Estação tenha um sistema monitoração em um supervisório na sala de operação da estação, ver Apêndice A Pg. (145).

- Categoria da Detecção

A categoria da detecção é **1 (Hum),** denominado: "**Alta**", conforme tabela B1 do Anexo A da Pg.(152). Ou seja, possui recursos de detecção e monitoração instalados no equipamento.

4.1.8.9 NPR

O NPR para o Item Quadro de Comando foi **6 (Seis)**, ficando na 8ª colocação do ranking, isto significa que a ocorrência do evento indesejado parada da Bomba Centrífuga causado por **Falta de Eletricidade** tem muito baixo potencial de risco. Esta percepção é observado a partir do resultado dos NPR's dos outros itens, comparativamente, como demonstrado no quadro 8.

4.1.9 Motor

A descrição funcional do Motor Elétrico da bomba Centrífuga é transmitir força para sistema de compressão da Bomba Centrífuga

4.1.9.1 Motivo

O motivo para este item ser analisado pela FMEA é por sua falha provocar a parada do equipamento ou não partir sob demanda.

4.1.9.2 Modo de falha

O modo de falha do motor elétrico é não transmitir força para sistema de compressão da Bomba Centrífuga.

4.1.9.3 Efeito potenciais da falha

O efeito potencial de falha na ocorrência do evento é a parada o equipamento ou não partir sob demanda.

4.1.9.4 Mecanismo de dano e falhas

Os mecanismos potenciais de falha ou Causa provável, foram selecionados os que possuem histórico conhecidos pelos especialistas: **Falta de Eletricidade no Motor**

A falta de e eletricidade do Motor é uma causa provável de falha e pode-se considerar os seguintes eventos:

- Curto Circuito: devido a falha no sistema de proteção, baixa isolação ou agentes externos como água;
- Descarga atmosférica.

4.1.9.5 Severidade do evento por Falta de Eletricidade

A severidade foi analisada pelo lado da disponibilidade e da freqüência desse evento, pelos especialistas.

- Categoria da Severidade

A categoria de severidade da falha é **3 (Três),** é denominada de "**Moderada"**, vide tabela B2 do anexo A Pg. (153).

- Efeito sobre as pessoas

Os efeitos desse evento, segundo essa categoria, é que ocorra acidente com potencial para afastamento das pessoas atingidas por um período maior do que 15 dias, vide tabela B2 do anexo A Pg. (153).

- Efeito sobre o patrimônio

O efeito sobre o patrimônio são os custos com danos matérias serem considerados "**Moderados**" com relação ao custo para aquisição de um novo equipamento, vide tabela B2 do anexo A Pg. (153).

- Efeito sobre o Meio Ambiente

O efeito sobre o meio ambiente é o impacto de **"magnitude considerável",** conforme tabela B2 do anexo A Pg. (153).

- Efeito sobre a Operação

O efeito sobre a operação considera o tempo para reparo do equipamento reposição da operação seja de 7 dias, devido a dificuldade de aquisição no mercado, complexidade do reparo e não ter sobressalente na empresa, vide tabela B2 do anexo A Pg. (153).

4.1.9.6 Freqüência

A freqüência de paradas do equipamento por falhas de devida a **Falta de Eletricidade no Motor**, foram obtidas través do consenso das opiniões dos especialistas.

- Categoria de Freqüência

A categoria de freqüência é **2 (dois),** denominado "**Remota".** Nessa categoria não é esperado que ocorra pelo menos uma vez durante toda a vida útil do equipamento, de acordo com a tabela B1 do anexo A, Pg. (152).

4.1.9.7 Criticidade

Na avaliação dos especialistas o item **Motor Elétrico** com seus mecanismos potenciais de falhas: **Falta de Eletricidade**, foi considerada de muito baixo potencial, isto significa que a causa deste evento provocará conseqüências "**Toleráveis"** para SMS, Operação e Manutenção.

- Categoria da Criticidade

A categoria da criticidade é a **"C",** segundo tabela B5 do anexo A Pg. (155), é considerada **"TOLERÁVEL"**. Isto significa não há necessidade de medidas mais rigorosas e que medidas de proteção e monitoração atendem para mitigar ou eliminarem o risco de ocorrência desse evento, tabela B1 do anexo A, Pg. (152).

- Medidas preventivas

As sugestões de medidas preventivas desta categoria para os itens: Projeto de fabricação; Projeto de Instalação e manutenção é que estes devem ser contemplados dentro de uma política de manutenção baseada em confiabilidade.

4.1.9.8 Detecção

A detecção da falta de eletricidade para alimentação do Motor é facilmente percebida, considerando que na estação tenha um sistema monitoração em um sistema supervisório da operação de injeção de água, ver apêndice A Pg. (145).

- Categoria da Detecção

A categoria de detecção conforme tabela B3 do anexo A da Pg. (154), é **1 (um),** denominado: "**Alta**", ou seja, possui recursos de detecção e monitoração instalados no equipamento, ver apêndice A Pg. (145).

4.1.9.9 NPR

O NPR para o Item Quadro de Comando foi **6 (Seis)**, ficando na 9ª colocação do ranking, isto significa que a ocorrência do evento indesejado parada da Bomba Centrífuga causado por **Falta de Eletricidade** é de muito baixo potencial de risco. Esta percepção é observado a partir do resultado dos NPR's dos outros itens, comparativamente, como demonstrado no quadro 8.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E EFEITOS – FMEA

Na planilha 2 , contém o resultado modos de falhas dos elementos que compõem a bomba centrífuga de múltiplos estágios utilizada para injeção de água para recuperação de petróleo e seus efeitos sobre o sistema, as pessoas e ao meio ambiente incluído a sua criticidade das opiniões feitas pelos especialista: Operadores, Engenheiros, Técnicos Mecânicos; Técnicos de Instrumentação; Químicos de processo e Consultores, da área de exploração e produção de petróleo.

NORMA Petrobras N-2781		ANÁLISE DOS EFEITOS E MODOS DE FALHAS DOS PROCESSOS FMEA								
Índice	**Item**	**Função do Processo**	**Modo de Falha**	**Efeitos potenciais de falha**	**SEVERIDADE**	**CLASSIFICAÇÃO**	**Causa(s) Mecanismos(s) Potenciais de Falha**	**Freqüência**	**DETECÇÃO**	**NPR**
4.1.1	Carcaça	Conter fluído	Não conter fluído	Parada da bomba	5	B	Rachadura Degradação	2	3	30
4.1..2	Eixo	Transmitir força	Não transmitir força	Parada da bomba	3	C	Quebra	2	3	18
4.1.3	Disco de equilíbrio	Manter o sist. em equilíbrio dinâmico	Não manter o sist. em equilíbrio dinâmico	Parada da bomba	4	A	Quebra dos internos Temperatura	4	2	32
4.1.4	Selo	Conter fluído	Não conter fluído	Parada da bomba	3	A	contaminação por sólidos Temperatura	5	2	30
4.1.5	Skid	Fixação do conjunto Bomba e Motor	Não fixar conjunto Bomba e Motor	Mau funcionamento da bomba	1	C	Vibração	4	2	8
4.1..6	Impelidor	Pressurizar fluído	Não pressurizar fluído	Parada da bomba	5	A	Quebra Cavitação	3	1	15
4.1.7	Mancal	Suportar o eixo	Não suportar o eixo	Parada da bomba	3	B	Alto aquecimento	3	2	18
4.1.8	Comando	Controle do motor proteção	Não controlar o motor e não proteger	Parada da bomba	3	C	Falta de eletricidade	2	1	6
4.1.9	Motor	Transmitir força	Não transmitir força	Parada da bomba	3	C	Falta de eletricidade	2	1	6

Planilha 2 - Resultado da FMEA da Bomba Centrífuga.

4.3 NPR Versus Classificação N-2781 de Criticidade

Os Itens Críticos classificados pelo Número de Proteção e Risco são comparados com a classificação (A, B, C, D) segundo a norma N-2781 no **Quadro (8)** contém o ranking dos componentes da Bomba centrífuga mais críticos, do menor ao de maior índice de criticidade.

Posição	Item	Causa(s) Mecanismos(s) Potenciais de Falha	NPR	Classificação N-2781
1º	**Disco de equilíbrio**	Quebra dos internos/Temperatura alta	**32**	**A**
2º	**Selo**	Contaminação por sólidos/ Temperatura alta	**30**	**A**
3º	**Carcaça**	Rachadura/Degração	**30**	**B**
4º	**Mancal**	Alto aquecimento	**18**	**B**
5º	**Eixo**	Quebra	**18**	**C**
6º	**Impelidor**	Quebra e vibração	**15**	**C**
7º	**Skid**	Vibração	**8**	**C**
8º	**Comando**	Falta de eletricidade	**6**	**C**
9º	**Motor**	Falta de eletricidade	**6**	**C**

Quadro 7 - NPR, Nível de Proteção e Risco.

Ao admitir o NPR como referência, pode-se incorrer no risco de alguns itens importantes serem desconsiderados, ou não ser dada a importância devida; o motivo seria que a detecção tem valor inversamente proporcional com relação à severidade e à freqüência.

Ao se admitir o gráfico de criticidade como referência, vide anexo A tabela B5 Pg. (155), tem-se uma aproximação mais realística da situação de campo, sendo assim, alguns autores recomendam que o uso do gráfico seja tomado como referência na avaliação qualitativa do FMEA (PALADY, 1997).

Exemplo:

Itens	Causa	Severidade (0-5)	Frequência (0-5)	Detecção (0-5)	NPR (SxFxD)	Classificação (A;B;C)
Carcaça	(fissura)	5	2	3	30	B

Quadro 8 – Item Carcaça

Observa-se que o item Carcaça com NPR 30 teve classificação B, de acordo com a matriz de criticidade, apesar de ser um dos o mais alto no NPR. Pelo fato de ser um item crítico, mesmo em caso de falha, a freqüência é baixíssima, ou seja, a probabilidade de que este evento ocorra é remota devido ao histórico de falhas

registrado no campo. Desta forma, deve-se ponderar qual índice a ser escolhido e quais as ações a serem tomadas em função desses resultados.

4.4 RESULTADO QUANTITATIVO DA ANÁLISE DE VIDA DA BOMBA CENTRÍFUGA

O resultado da análise de vida da Bomba Centrífuga foi processado no software ***BolckSim*** da ***ReliaSoftg*** através de simulações de Monte Carlo como mostra a figura 21, a partir daí analisamos os dois cenários definidos na metodologia:

O gráfico da simulação mostra que no início da contagem do tempo a confiabilidade e a disponibilidade são máximas e são aquelas representadas na região I da curva da banheira, isto não significa que, durante todo o período 43800 horas, algum item tenha sua disponibilidade maior ou menor do que a disponibilidade do sistema, assim como a confiabilidade.

A justificativa é a possibilidade de reparo do item e/ou do sistema, ao sofrer reparo o item ou sistema, considera-se que este volte ao estágio original.

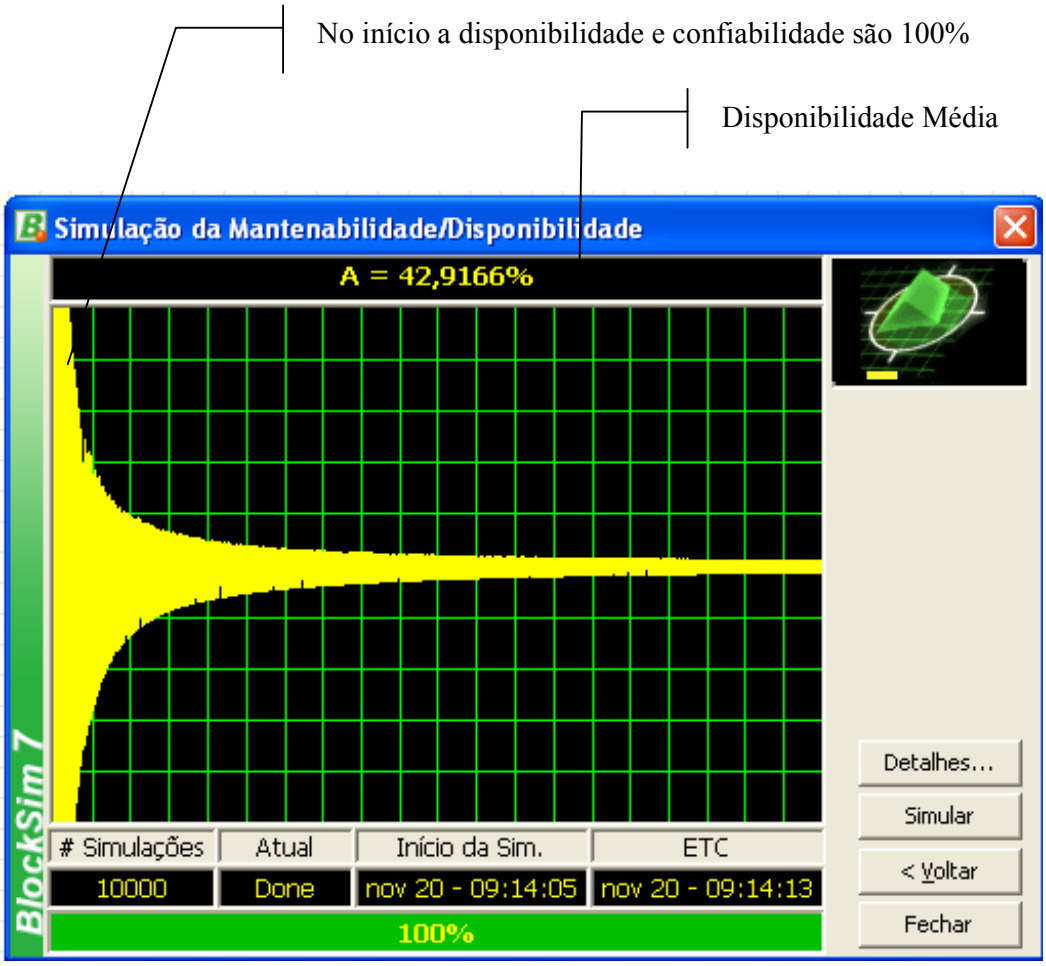


Figura 21 - Simulador, 10.000 eventos

Fonte: ReliaSoft Brasil, 2006

4.4.1 Primeiro Cenário: Sem Manutenção

Neste cenário consideramos que não há intervenção de manutenção para conserto do equipamento.

Resultado dos cálculos de confiabilidade e disponibilidade conforme **quadro 9 para** avaliação geral do sistema bomba centrífuga e **quadro 10** para avaliação individual de cada item do sistema.

4.4.1.1 Confiabilidade 1º Cenário

A confiabilidade geral, vide gráfico da figura 22, do sistema Bomba Centrífuga para uma campanha de 5 anos (43800 horas) foi calculada em 13,08 % , vide quadro 9 e **figura 22.**

Para os especialistas o sistema dessa bomba é pouco confiável e há uma grande probabilidade, que ocorra uma parada por falha a qualquer momento nesse período.

No período de 1 ano é 34%; 2 anos, 58%; 3 anos, 73%; e 5 anos é de 86,92%. Como demonstrado no gráfico da **figura 23**. Isto significa que este sistema pode parar por falhas individuais dos itens que o compõe antes do término da campanha de 5 anos de injeção de água na estação. Outra interpretação seria se o sistema tivesse 100 bombas operando no final de 5 anos só teríamos 13 bombas funcionando e 87 inoperantes.

Este resultado é considerado muito baixo se comparado com outras bombas de mesma funcionalidade, segundo a opinião de especialistas, que leva em consideração outras bombas similares para o mesmo objetivo (Injeção de água) instalado no campo.

4.4.1.2 Disponibilidade média 1º Cenário

A disponibilidade média referente a todos os eventos calculado é de 0,4292 ou 42,92%, ou seja, tempo total disponível é de 18797,46 horas, vide quadro 9, o que significa que num período de 5 anos terá um tempo médio disponível para operação da bomba **2,15 anos (dois anos hum mês e vinte quatro dias)** aproximadamente, como demonstrado no gráfico da figura 22. O tempo de indisponibilidade foi de 25002,04, vide quadro 9, que o equipamento não funcionará por **2,85 anos (dois anos 10 meses e seis dias)** aproximadamente.

- Desvio padrão da Disponibilidade

O resultado do desvio padrão foi de 0,3306, vide quadro 9, isso significa que a disponibilidade média pode oscilar entre 0,76 e 0,10.

- Quantidade esperada de falhas

A quantidade média esperada de falhas no sistema é de 0, 8692, vide quadro 9.

Desvio padrão da quantidade de falhas esperadas

O desvio padrão da quantidade de falhas é de 0, 3372, vide quadro 9. Significa um oscilação entre 0,5320 a 1,2064 no total de falhas esperadas.

- Tempo Médio até a Primeira Falha- TMAPF

O tempo médio ate a primeira falha foi de 21626,17 horas, vide quadro 9, isto significa que primeira falha do sistema bomba centrífuga ocorrerá em **2,57 (dois anos cinco meses e dezenove dias)** de funcionamento.

4.4.1.3 Resultado Individual

O resultado individual de cada item que compõe o sistema bomba centrífuga esta apresentado na ordem decrescente de confiabilidade, conforme quadro 10.

4.4.1.3.1 Selos 1 e 2

Os selos 1 é do lado da sucção e o selo 2 do lado descarga estão na 1ª colocação selo 2 e na segunda colocação o selo 1, dos itens com importância de criticidade RS FCI: 45,47% e 47,75% ,respectivamente, vide quadro 10.

- Confiabilidade dos Selos 1 e 2

A confiabilidade dos selos 1 e 2 foi de 39,20%, vide quadro 10, e a probabilidade de ocorrência de falha é 60,80%.

Sendo um dos itens menos confiáveis e mais críticos do subsistema que compõem o sistema Bomba Centrífuga segundo o índice RS FCI.

- Disponibilidade dos Selos 1 e 2

A disponibilidade média dos selos 1 e 2 foi: 0,729 (72,90 %) e 0,7389(73,89%) , com tempo disponível de 31931,42 horas ou **3,65 (três anos e sete meses e 24 dias)** e 32364,51 horas ou **3,69 (três anos oito meses e 8 dias)** respectivamente, vide quadro 10.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,415 e 0,3952, respectivamente, vide quadro 10. Isto significa que menos de uma parada ocorrerá no período de 5 anos por falha dos selos mecânicos

O tempo indisponível dos Selos 1 e 2 foi 11868,57 horas ou **1,35 anos (um ano três meses e 15 dias)** e 11435,49 ou **1,36 anos (um ano três meses e 18 dias) aproximada mente.**

4.4.1.3.2 Carcaça da Bomba Centrífuga

A carcaça da bomba ficou na terceira colocação no ranking da criticidade RS FCI: 4,73%, e a sua disponibilidade é maior que a dos selos, vide quadro 10.

- Confiabilidade da Carcaça da bomba centrífuga

A confiabilidade da Carcaça da bomba centrífuga foi: 90,80%, vide quadro 10. Este valor é considerados **excelente**, ou seja, há uma probabilidade de ocorrência de falha de 10,20 % no período de 5 anos.

- Disponibilidade da Carcaça da Bomba centrífuga

A disponibilidade média da Carcaça da Bomba centrífuga foi: 97,26 %, com tempo disponível de 42601,17 horas ou **4,93 anos (quatro anos dez meses e nove dias)**, vide quadro 10.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,04, vide quadro 10. Isto significa que não haverá parada no período de 5 anos por falha da Carcaça. O tempo indisponível da Carcaça foi 1198,82 horas ou 1 mês e 20 dias.

4.4.1.3.3 Eixo da Bomba Centrífuga

O Eixo da bomba ficou na quarta colocação no ranking dos itens críticos segundo o índice RS FCI: 1,56%, no entanto, a sua disponibilidade é maior que a da carcaça e dos selos, vide quadro 10.

- Confiabilidade do Eixo da Bomba Centrífuga

A confiabilidade do Eixo da bomba centrífuga cresceu insignificantemente, foi para **96,30%**, vide quadro 12. Este valor é considerado **excelente**, ou seja, há uma probabilidade de ocorrência de falha de **3,70 %** no período de 5 anos.

- Disponibilidade do Eixo da Bomba Centrífuga

A disponibilidade média do Eixo da Bomba Centrífuga foi: 99,14 %, com tempo disponível de 43424,32 horas ou **4,96 anos (quatro anos e onze meses e meio)**, vide quadro 10.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,01, vide quadro 10.

Isto significa que não haverá parada no período de 5 anos por falha do Eixo.

O tempo indisponível do Eixo foi 375,67 horas ou 7 dias.

4.4.1.3.4 Impelidor da Bomba Centrífuga

O Impelidor da bomba ficou na quinta colocação no ranking dos itens críticos segundo o índice RS FCI: 0,12%, no entanto, a sua disponibilidade é maior que a do Eixo, carcaça e dos selos, vide quadro 10.

- Confiabilidade do Impelidor da Bomba Centrífuga

A confiabilidade do Eixo da bomba centrífuga cresceu insignificantemente, foi para **99,70%**, vide quadro 12. Este valor é considerado **ótimo**, ou seja, há uma probabilidade de ocorrência de falha de **0,30 %** no período de 5 anos.

- Disponibilidade do Impelidor da Bomba Centrífuga

A disponibilidade média do Impelidor da Bomba Centrífuga foi: 99,93%, com tempo disponível de 43767,18 horas ou **4,96 anos (quatro anos e onze meses e vinte sete dias)**, vide quadro 10.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,001, vide quadro 10.

Isto significa que não haverá parada no período de 5 anos por falha do Impelidor

O tempo indisponível do Eixo foi 32,82 horas ou 1 dia.

4.4.1.3.5 Skid; Mancal Descarga; Mancal Sucção; Comando; Motor; Disco de equilíbrio

Estes itens ficaram na 6ª colocação no ranking dos itens críticos segundo o índice RS FCI: 0,00%, os menos críticos.

Não foi possível simular a vida útil desses itens por não terem dados de taxas de falhas conhecidos, por isso apresentam no quadro 10, confiabilidade é de 1,00(100%); total de paradas e tempo de indisponibilidade igual a 0 (zero); a disponibilidade é igual a 1,00 (um) 100%, o que significa que estará com tempo total disponível igual ao tempo total estimado de funcionamento da estação de 43800 horas (5 anos).

Resumo dos resultados Sistema		
Parâmetros	**Resultado**	**Unidades**
Confiabilidade(43800):	13,08	%
Disponibilidade média (todos os eventos):	42,92	%
Tempo disponível:	18797,46	Horas
Tempo indisponível total:	25002,54	Horas
Desvio padrão(Disponibilidade)	0,3306	Unitário
Quantidade esperada de falhas:	0,8692	Unitário
Desvio padrão (quantidade de falhas):	0,3372	Unitário
TMAPF	21626,17	Horas

Quadro 9 - Resultado geral do Sistema no 1° Cenário

Fonte: Software ReliaSoft.

Posição	Nome do Item	Confiabilidade	RS FCI	Disp. Média	Paradas Falhas	Tempo Indisponível	Tempo Disponível do Bloco
1º	Selo 2	39,20%	47,75%	0,7290	0,415	11868,5737	31931,4263
2º	Selo 1	39,20%	45,47%	0,7389	0,3952	11435,4891	32364,5109
3º	Carcaça	90,80%	4,73%	0,9726	0,0411	1198,8286	42601,1714
4º	Eixo	96,30%	1,56%	0,9914	0,0136	375,6716	43424,3284
5º	Impelidor	99,70%	0,12%	0,9993	0,001	32,8222	43767,1778
6º	Skid	100%	0,00%	1	0	0	43800
	Mancal Descarga	100%	0,00%	1	0	0	43800
	Mancal Sucção	100%	0,00%	1	0	0	43800
	Comando	100%	0,00%	1	0	0	43800
	Motor	100%	0,00%	1	0	0	43800
	Disco de Equilíbrio	100%	0,00%	1	0	0	43800

Quadro 10 - Resultado de Confiabilidade no 1º Cenário, Ranking da Confiabilidade

4.4.2 Gráfico da Confiabilidade

Na figura 22 observamos o decrescimento da confiabilidade ao longo do tempo.

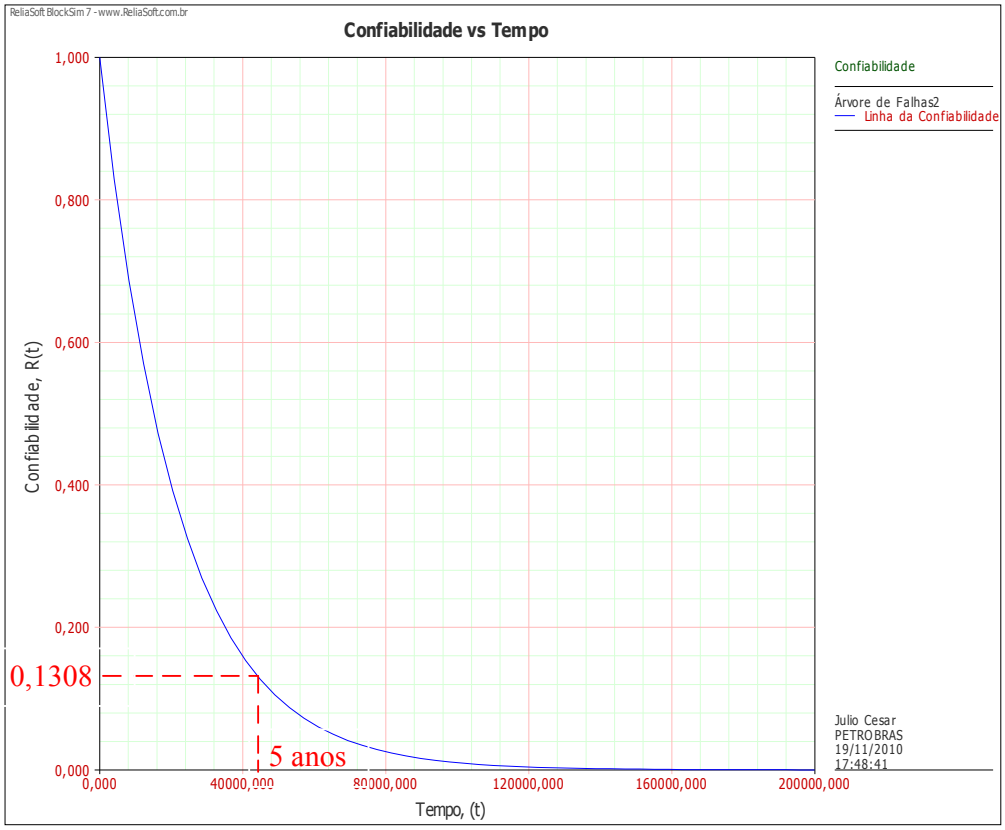


Figura 22- Gráfico da ConfiabilidadeI

Fonte: Software ReliaSoft-BlockSim

Na figura 23**,** observamos que a probabilidade de falhas aumenta com o passar do tempo.

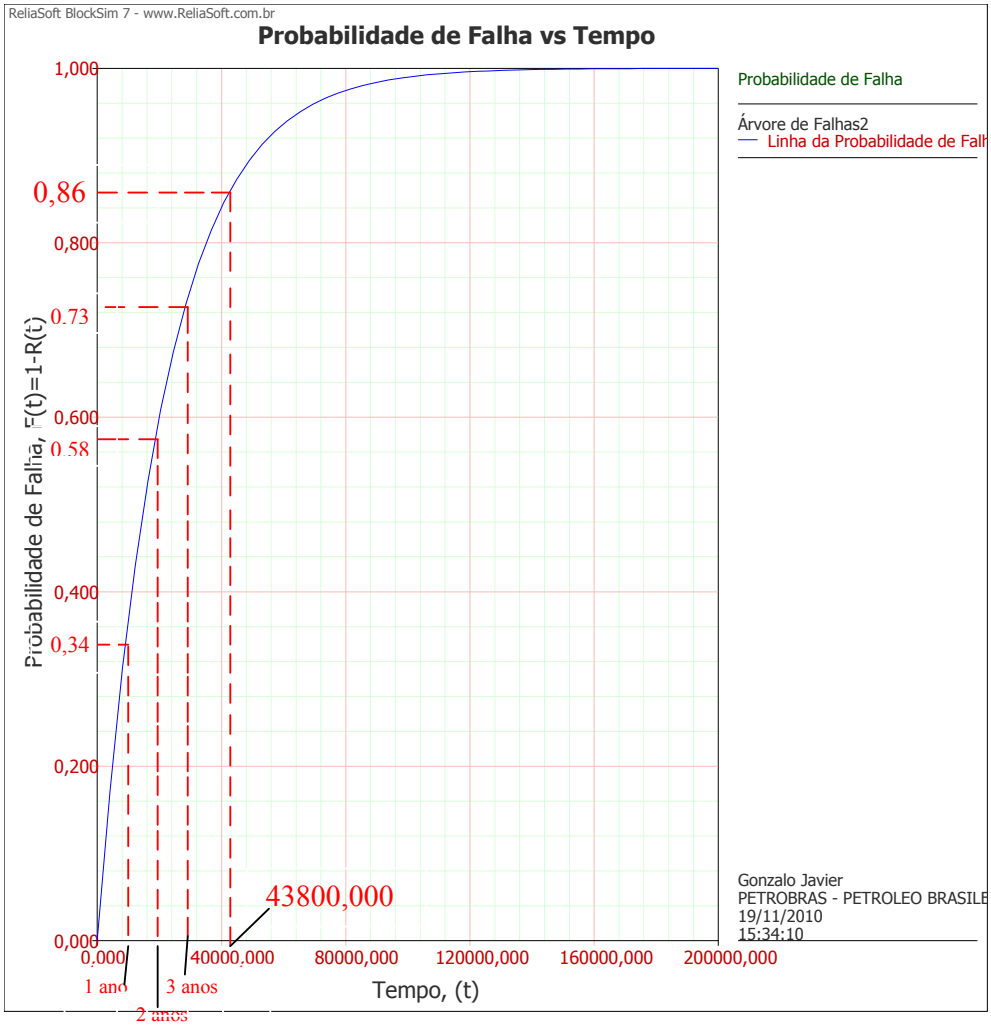


Figura 23-Gráfico da Probabilidade de Falha I.

Fonte: Software ReliaSoft-BlockSim

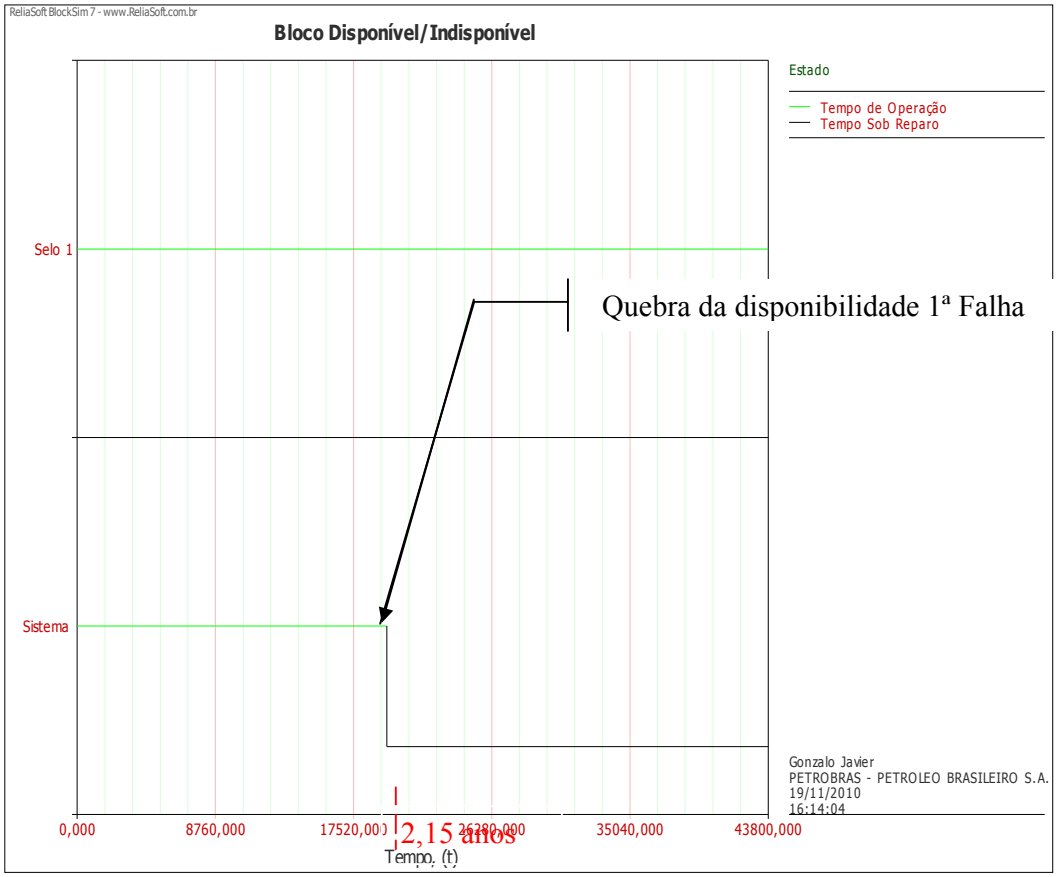


Figura 24- Gráfico da Disponibilidade I

Fonte: Software ReliaSoft-BlockSim

4.4.3 Segundo Cenário: com Manutenção Corretiva

Neste caso considera-se que o equipamento terá, após a falha, parada para reparo e reposição para operação, ou seja, o item é reparável.

4.4.3.1 Confiabilidade 2º Cenário

A confiabilidade geral do sistema, vide gráfico da figura 25, Bomba Centrífuga no segundo cenário para uma campanha de 5 anos (43800 horas) foi de 13,51 % ,vide quadro 11, praticamente igual ao primeiro, isto significa que o sistema dessa bomba

continua pouco confiável e que há uma grande probabilidade, 86,49%, desse sistema falhar, como demonstra o gráfico da figura 26.

4.4.3.2 Disponibilidade média no 2º Cenário

A disponibilidade média referente a todos os eventos calculado é de 0,9808 ou 98,08%, ou seja, tempo total disponível é de 42960,09 horas, vide quadro 11, o que significa que num período de 5 anos terá um tempo disponível para operação da bomba **4,90 anos (quatro anos 10 meses e vinte quatro dias)** aproximadamente, como demonstrado no gráfico da figura 25.

O tempo de indisponibilidade foi de 700,71 horas, vide quadro 11, o que significa que o equipamento não funcionará por **29 dias,** aproximadamente.

A disponibilidade média aumentou porque o sistema é reparável e a cada reparo da bomba o equipamento volta para o estado inicial, ou seja, uma confiabilidade inicial de 100% novamente.

- Desvio padrão da Disponibilidade

O resultado do desvio padrão foi de 0,05, vide quadro 9, isso significa que a disponibilidade média pode oscilar entre 1,00 e 0,93.

- Quantidade esperada de falhas

A quantidade média esperada de falhas no sistema é de 1,96, vide quadro 11, ou seja, no período de 5 anos teremos aproximadamente 2 falhas no sistema.

Desvio padrão da quantidade de falhas esperadas

O desvio padrão da quantidade de falhas é de 1,38 vide quadro 11.

Podendo ter de 0,58 a 3,34 no período, esta variação é devido à natureza da amostra (média de falha por simulação) no período.

- Tempo Médio até a Primeira Falha- TMAPF

O tempo médio ate a primeira falha foi de 21886, 10 horas, vide quadro 11, isto significa que primeira falha do sistema bomba centrífuga ocorrerá em **2,49 (dois anos e 6 meses)** de funcionamento.

4.4.3.3 Resultado Individual no Segundo Cenário

O resultado individual de cada item que compõe o sistema bomba centrífuga esta apresentado na ordem decrescente de confiabilidade, conforme quadro 12.

4.4.3.3.1 Selos 1 e 2 no Segundo Cenário

Os selos 1 e 2 são, respectivamente, o do lado da sucção e o do lado descarga estão na primeira colocação selo 1 e na segunda colocação o selo 2, dos itens menos confiáveis e mais críticos segundo RS DECI : 46,82% e 46,33% respectivamente, vide quadro 12.

- Confiabilidade dos Selos 1 e 2

A confiabilidade dos selos 2 e 1 foi de 39,20%, vide quadro 12. A probabilidade de ocorrência de falha é 60,80 % em ambos os selos

Ocupando os primeiros lugares no ranking críticos segundo o índice RS DECI que compõem o sistema Bomba Centrífuga. Estes valores são considerados idênticos a primeira condição: sem manutenção.

- Disponibilidade dos Selos 1 e 2 no segundo cenário

A disponibilidade média dos selos 1 e 2 foi: 0,9926 ou (99,26 %) e 0,9925(99,25%) , com tempo disponível de 43471,32 horas ou **4,62 anos (quatro anos e onze meses e 15 dias)** e 43465,15 horas ou **4,69 (quatro anos e onze meses e 15 dias)** respectivamente, vide quadro 12.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,9072 e 0, 9173, respectivamente, vide quadro 12. Isto significa que uma parada ocorrerá no período de 5 anos por falha dos selos mecânicos

O tempo indisponível dos Selos 1 e 2 foi 324,48 horas ou **13 dias e 12 horas** e 330,65 ou **13 dias** e **18 horas, aproximada mente.**

4.4.3.3.2 Carcaça da Bomba Centrífuga

A carcaça da bomba continuou na terceira colocação no ranking da criticidade RS DECI: 4,67%, no entanto, a sua disponibilidade continuou maior do que a dos selos, vide quadro 12.

- Confiabilidade da Carcaça da bomba centrífuga

A confiabilidade da Carcaça da bomba centrífuga foi: 90,80%, vide quadro 12, a mesma do primeiro cenário. Este valor é considerado **excelente**, ou seja, há uma probabilidade de ocorrência de falha continua em 10,20% no período de 5 anos.

- Disponibilidade da Carcaça da Bomba centrífuga

A disponibilidade média da Carcaça da Bomba centrífuga foi: 0,9993 ou 99,93%, com tempo disponível de 43767,69 horas ou **4,99 anos (5 anos) aproximadamente**, vide quadro 12.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,0925, vide quadro 12.

Isto significa que não haverá parada no período de 5 anos por falha da Carcaça. O tempo indisponível da Carcaça foi 32,31 horas durante os 5 anos de operação.

4.4.3.3.3 Eixo da Bomba Centrífuga

O Eixo da bomba continuou na quarta colocação no ranking da criticidade RS DECI: 1,84%, no entanto, a sua disponibilidade é maior que a da carcaça e dos selos, vide quadro 12.

- Confiabilidade do Eixo da Bomba Centrífuga

A confiabilidade do Eixo da bomba centrífuga cresceu insignificantemente, foi para **96,30%**, vide quadro 12. Este valor é considerado **excelente**, ou seja, há uma probabilidade de ocorrência de falha de **3,70 %** no período de 5 anos.

- Disponibilidade do Eixo da Bomba Centrífuga

A disponibilidade média do Eixo da Bomba Centrífuga cresceu e foi: 0,9997 ou 99,97 %, com tempo disponível de 43787,25 horas ou **4,99 anos (cinco anos aproximadamente)**, vide quadro 12.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,0364, vide quadro 12.

Isto significa que não haverá parada no período de 5 anos por falha do Eixo.

O tempo indisponível do Eixo foi 12,75 horas num período de 5 anos.

4.4.3.3.4 Impelidor da Bomba Centrífuga

O Impelidor da bomba continuou na quinta colocação no ranking da criticidade RS DECI: 0,08%, entretanto, a sua disponibilidade é maior que a do Eixo, carcaça e dos selos, vide quadro 10.

- Confiabilidade do Impelidor da Bomba Centrífuga

A confiabilidade do Impelidor da bomba centrífuga continuou a mesmo do primeiro cenário, que foi **99,70%**, vide quadro 12. Este valor é considerado **ótimo**, ou seja, há uma probabilidade de ocorrência de falha de **0,30 %** no período de 5 anos.

- Disponibilidade do Impelidor da Bomba Centrífuga

A disponibilidade média do Impelidor da Bomba Centrífuga foi para 99,93%, com tempo disponível de 43799,49 horas ou **4,99 anos (Cinco anos aproximadamente)**, vide quadro 12.

A quantidade de parada por falha nos selos mecânicos é 0,0015, vide quadro 10. Isto significa que não haverá parada no período de 5 anos por falha do Impelidor. O tempo indisponível do Eixo foi 0,51 horas.

4.4.3.3.5 Skid; Mancal Descarga; Mancal Sucção; Comando; Motor; Disco de equilíbrio

Estes itens continuaram na 6ª; colocação no ranking da criticidade.

Possuem RS DECI igual a. "0,0" (0,00%) e confibilidade de 1,00 (100%), visto que, não foi possível simular a vida útil por não terem dados de taxas de falhas

conhecidos, por isso apresentam no quadro 10 confiabilidade, total de paradas e tempo de indisponibilidade igual a 0 (zero), a disponibilidade é igual a 1,00 (um) o que significa que estará com tempo total disponível igual ao tempo total estimado de funcionamento da estação de 43800 horas (5 anos) .

Resumo dos resultados Sistema		
Parâmetros	**Resultado**	**Unidades**
Confiabilidade(43800):	13,51	%
Disponibilidade média (todos os eventos):	98,08	%
Desvio padrão(Disponibilidade)	0,05	Unitário
Tempo disponível:	42960,09	Horas
Tempo indisponível total:	700,709	Horas
TMAPF	21886, 1013	Horas
Quantidade esperada de falhas:	1,9603	Unitário
Desvio padrão (quantidade de falhas):	1,376	Unitário

Quadro 11 - Resultado geral do sistema no 2º Cenário

Posição	**Nome do Item**	**Confiabilidade**	**RS DECI**	**Disp. Média**	**Paradas Falhas**	**Tempo Indisponível**	**Tempo Disponível**
1º	Selo 1	39,20%	46,82%	99,26 %	0,9072	328,6782 h	43471,32 h
2º	Selo 2	39,20%	46,33%	99,25 %	0,9173	334,8489 h	43465,15 h
3º	Carcaça	90,80%	4,67%	99,93 %	0,0925	32,3124 h	43767,69 h
4º	Eixo	96,30%	1,84%	99,97 %	0,0364	12,7501 h	43787,25 h
5º	Impelidor	99,30%	0,08%	100 %	0,0015	0,5098 h	43799,49 h
6º	Skid	99,70%	0,00%	100 %	0	0	43800 h
	Mancal Descarga	100%	0,00%	100 %	0	0	43800 h
	Mancal Sucção	100%	0,00%	100 %	0	0	43800 h
	Comando	100%	0,00%	100 %	0	0	43800 h
	Motor	100%	0,00%	100 %	0	0	43800 h

Quadro 12 - Resumos individuais, ranking da Confiabilidade 2º cenário

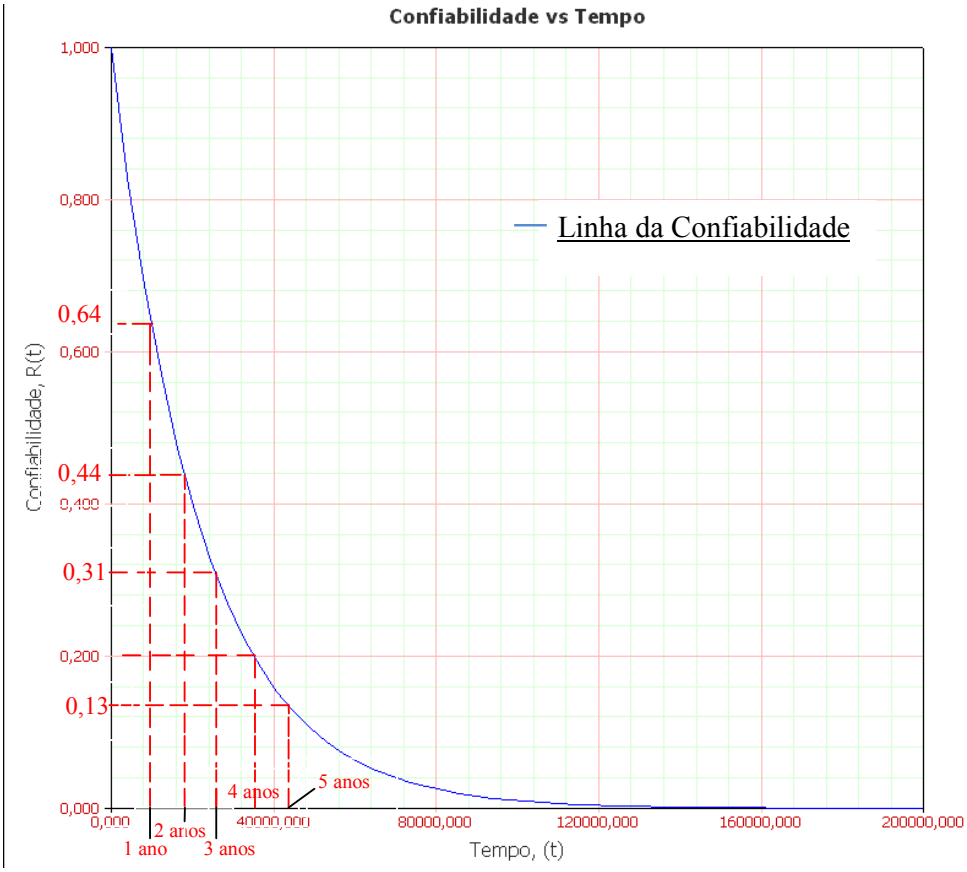


Figura 25- Gráfico da Confiabilidade II

Fonte: Software ReliaSoft-BlockSim

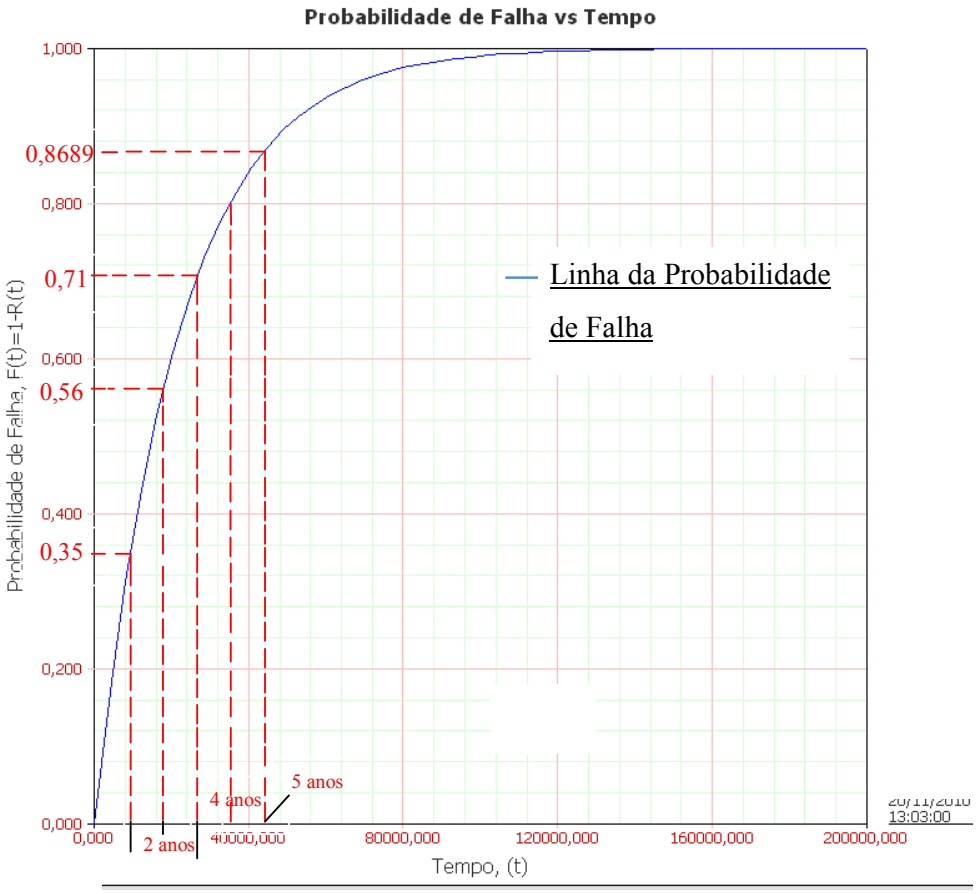


Figura 26- Gráfico da Probabilidade II

Fonte: Software ReliaSoft-BlockSim

Figura 27- Gráfico da Disponibilidade II

Fonte: Software ReliaSoft-BlockSim

4.4.4 Comparativo dos resultados do Primeiro Cenário versus Segundo Cenário com o resultado qualitativo do FMEA.

Comparando o resultado do cálculo de vida do primeiro cenário e do segundo cenário com o resultado qualitativo da FMEA, verifica-se que a confiabilidade da Bomba Centrífuga praticamente não se alterou foi de 13,08% para 13,51%, uma variação insignificante.

Quanto à disponibilidade média do sistema, este sim depende da configuração da mantenabilidade: se é ou não reparável, esta passou de 2,85 anos (sem reparo) para 4,90 anos (com reparo), entretanto considera-se que na segunda condição após o reparo o item volte ao seu estado inicial, aumentando o tempo disponível do sistema para operação.

4.4.4.1 Selos Mecânicos 1 e 2

Apresentam taxa de falhas históricas elevadas e iguais a 21,34 e apresenta a mesma Confiabilidade: 39,20%, a menor dos subsistemas da bomba centrífuga, tanto no primeiro como no segundo cenários. A expectativa de vida desse item é de 1,96 anos e a importância desse item para o RS FCI e RS DECI, continuou praticamente a mesma em 47%, colocando-os como os itens mais importantes na falha do sistema bomba centrífugas, vide quadro 13.

Este item foi considerado como nível de proteção e risco (NPR) 32, e classificação da categoria de criticidade "A" na FMEA, confirmando que sua falha compromete a disponibilidade do sistema, pois é o que falha mais, vide quadro 13.

Já a disponibilidade aumenta no segundo cenário, passando de 73% para 99% no selo 2 e 74% para 99 %, selo 1 , uma diferença de 23% e 24%, o que significa um ganho de 2,19 anos nos selo 1 e 2, aproximadamente. A parada para correção da falha possibilita esse ganho de tempo no segundo cenário, vide quadro 13.

Um maneira de se melhorar esse índice é atuando na causa raiz, APENDICE B Pg. (149), um exemplo de estudo nos selos mecânicos,observando-se a alta reparabilidade desse item.

4.4.4.2 Carcaça da bomba centrífuga

A carcaça da bomba centrífuga apresenta baixa taxa de falha 2,19, e a sua confiabilidade é alta 90,80%. Este teve alto nível de proteção e risco (NPR) 32 e classificação da categoria de criticidade "A" na FMEA, e a importância desse item para o RS FCI e RS DECI, continuou praticamente a mesma no primeiro e no segundo cenário, 4 %, vide quadro 13. O que significa que mesmo possuindo alta confiabilidade a sua falha para o sistema tem um alto potencial de risco a pessoas e instalações conforme relatado na discussão do FMEA, vide quadro 13.

A Disponibilidade no primeiro cenário para o segundo cenário passou de 97,26% para 99,93% uma diferença para maior de 2,67%, um ganho de 0,13 anos ou 1,6 meses, vide quadro 13.

4.4.4.3 Eixo da Bomba Centrífuga

O eixo da bomba centrífuga apresenta baixa taxa de falha 0,84, a sua confiabilidade é alta 96,30%. Este teve nível médio de proteção e risco (NPR) 18, e a classificação da categoria de criticidade "C" na FMEA. A importância desse item para o RS FCI e RS DECI, continuou praticamente a mesma no primeiro e no segundo cenário, 1 %, Isto significa que o item tem alta confiabilidade, mas que medidas de monitoração devem ser tomadas, conforme relatado na FMEA, vide quadro 13.

Disponibilidade no primeiro cenário para o segundo cenário passou de 99,14% para 99,97% uma diferença para maior de 0,83 %, um ganho de 0,42 anos ou 4,78 meses, vide quadro 13.

4.4.4.4 Impelidor da Bomba Centrífuga

O Impelidor da bomba centrífuga apresenta a menor taxa de falha 0,43, este teve nível médio de proteção e risco (NPR) 15, e a classificação da categoria de criticidade "C" na FMEA. A importância desse item para o RS FCI e RS DECI, continuou praticamente a mesma no primeiro e no segundo cenário, 0,1 %, Isto significa que item tem alta confiabilidade, mas que medidas rigorosas devem ser tomadas, conforme relatado na FMEA, vide quadro 13.

A Disponibilidade no primeiro cenário para o segundo cenário passou de 99,93% para 100% uma diferença para maior de 0,07 %, um ganho de 0,004 anos ou 1,5 dias, aproximadamente, vide quadro 13.

4.4.4.5 O Skid, Mancais de sustentação do eixo, Comando elétrico do motor, Motor e o Disco de Equilíbrio.

Estes itens não foram possíveis simular a vida útil por não terem dados de taxas de falhas conhecidos, por isso apresentam no quadro 13, confiabilidade de 100% e índice de importância RS FCI e RS DECI iguais a 0 (zero).

O tempo de disponibilidade média no primeiro e no segundo cenário de 100%, o que significa que estará com tempo total disponível igual ao tempo total estimado de funcionamento da estação de 43800 horas (5 anos) .

Nesse caso, a avaliação qualitativa feita no FMEA será o parâmetro para tomada de decisão dos gestores do ativo.

Nome do Item	Taxa de falhas λ(t)- Total OREDA	Confiabilidade Sem e com Manutenção	FMEA		RS FCI 1º cenário	RS DECI 2º cenário	Disp. Média 1º cenário	Disp. Média 2º cenário
			NPR	Classificação N-2781				
Selo 2	21,34	39,20%	**30**	**A**	47,75%	46,79%	72,90%	99,25%
Selo 1	21,34	39,20%	**30**	**A**	45,47%	46,28%	73,89%	99,26%
Carcaça	2,19	90,80%	**30**	**B**	4,73%	4,72%	97,26%	99,93%
Eixo	0,84	96,30%	**18**	**C**	1,56%	1,86%	99,14%	99,97%
Impelidor	0,43	99,70%	**15**	**C**	0,12%	0,08%	99,93%	100%
Skid	Não existem dados	100%	**8**	**C**	0,00%	0,00%	100%	100%
Mancal Descarga	Não existem dados	100%	**8**	**B**	0,00%	0,00%	100%	100%
Mancal Sucção	Não existem dados	100%	**8**	**B**	0,00%	0,00%	100%	100%
Comando	Não existem dados	100%	**6**	**C**	0,00%	0,00%	100%	100%
Motor	Não existem dados	100%	**6**	**C**	0,00%	0,00%	100%	100%
Disco de Equilíbrio	Não existem dados	100%	**32**	**A**	0,00%	0,00%	100%	100%

Quadro 13 - Comparativo dos resultados do Primeiro Cenário versus Segundo Cenário

CAPÍTULO 5

Conclusão

Capítulo 5

Neste capítulo estão descritos às conclusões do estudo sobre a confiabilidade de uma bomba centrífuga para injeção de água para recuperação de petróleo.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa contribui para destacar a importância da Engenharia da Confiabilidade no estudo do ciclo de vida do equipamento bomba centrífuga aplicado a um sistema de injeção de água para recuperação de petróleo.

O presente estudo possibilitou estimar, por simulação, para dois cenários distintos(sem manutenção e com manutenção corretiva), a confiabilidade de uma bomba centrífuga aplicada a um sistema de injeção de água para recuperação de petróleo, a partir de técnicas de análise de confiabilidade (FMEA e FTA) e utilizando-se do banco de dados do Oreda processados no *software* comercial denominado BlockSim.

Embora, os dois cenários sejam bastante distintos, o resultado da confiabilidade praticamente não se altera: 13,08% no primeiro cenário e 13,51% no segundo demonstrando que a confiabilidade é uma característica relacionada a qualidade do equipamento no que se refere a tipo de matérias utilizados na fabricação, qualidade produto fabricado, política adotada na empresa para manutenção, etc.

Com a alteração de "sem manutenção" para "com manutenção corretiva" a disponibilidade do equipamento passou de 42,92% para 98,08%, mais que dobrando o tempo disponível para operação, justificando o uso de uma politica de manutenção voltada para confiabilidade e resultados.

Nesse sentido, considera-se que os objetivos foram alcançados, não só pela qualidade dos resultados obtidos.

5.1 FMEA

A técnica de análise de falhas **FMEA** permitiu observar, qualitativamente, quais os itens mais críticos dentre aqueles que compõem o sistema Bomba Centrífuga através da opinião dos especialistas no setor de produção de petróleo *on shore.* Pode-se visualizar, após a definição da árvore funcional, a importância da criticidade de cada

item para o sistema Bomba Centrífuga, por sua vez fundamental ao sistema maior de injeção de água para recuperação de petróleo.

Ações de melhorias e de boas práticas de manutenção, como o emprego do MCC, foram listadas à medida que se classificava e se categorizava cada item de acordo com a norma Petrobras N-2781.

5.2 FTA

Paralelamente, os estudos quantitativos foram aprofundados por meio de uma **FTA** a partir da arvore funcional dos resultados qualitativos da FMEA, Isto possibilitou a visualização dos itens e suas funções no sistema bomba centrífuga.

Conclui-se, ser possível utilizar o FTA para o estudo das falhas do sistema e transformar num diagrama de blocos para se obter o resultado da confiabilidade do equipamento.

5.3 Oreda

As informações sobre taxas de falhas de equipamentos registradas e catalogadas no Oreda permitem o cálculo da confiabilidade, disponibilidade e mantenabilidade de uma bomba centrifuga e são coerentes com a realidade de produção em terra.

Nem todos os itens possuem registros de taxas de falhas, o que fragiliza a análise de vida do equipamento.

5.4 BLOCKSIM

O *software* comercial BlockSim desenvolvido pela empresa *ReliaSoft,* simulou os cenários possíveis de produção (sem manutenção e com manutenção), calculando, com dados de taxas de falhas do **Oreda**, a confiabilidade, disponibilidade e mantenabilidade do sistema Bomba Centrífuga e de cada item individualmente, com precisão**.**

Tomadas as informações qualitativas do ***FMEA*** associadas com os resultados da confiabilidade, disponibilidade e mantenabilidade, torna-se, portanto, possível ao gestor do ativo realizar um planejamento estratégico, implementando um plano de manutenção baseado em confiabilidade a partir dessa metodologia.

CAPÍTULO 6

Sugestões

Capítulo 6

Neste capítulo apresentam as sugestões referentes aos melhores metodologias e continuidade do estudo.

6. SUGESTÕES

Outras combinações entre a política de manutenção e operacionalidade do equipamento podem ser simuladas através de informações de bancos de dados próprios. Com isto, esta pesquisa aponta para a necessidade de:

- Desenvolver uma base de dados de falhas, semelhante ao Oreda para sistemas técnicos diferenciados;
- Criar o selo de confiabilidade associado á qualidade do produto.

CAPÍTULO 7

Referências Bibliográficas

7. REFERÊNCIAS BILIOGRÁFIACAS

Abernethy, R. B. **The New Weibull Handbook**. 2000.

Albu, A.; Ribeiro, L. **Estimativas de Reservas de Hidrocarbonetos**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1987.

Arsenault, J.; Robert, J. **Reliability and Maintainability of Eletronic Systems**. Rockville: Computer Science Press, 1980.

Assis, R. **Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos**. LIDEL, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: **Confiabilidade e Mantenabilidade**. 1993.

Barbetta, P. A. **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 5 ed. Florianopolis: Ed. Da UFSC, 2003.

Bloch, H. P.; Budris, A. R. **Pump User's Handbook: Life Extension.** Third Edition, 2010.

Brill, J. P.; Beggs, H. D. **Tow-Pse Flow in Pipe**. The Hague: Interconp Couse, 1974.

Collins, J. **Failure of Materials in Mechanical Desingn**. New York: John Wiley and Sons, 1981.

Drougrett, E. **Estimando a Confiabilidade de Produtos em Desenvolvimento**. Recife: PPGEP/UFPE, 2002.

Drougrett, E. L.; Mosleh, A. **Methodology for the Tratament of Model Uncertain, center or technology Risk studies**. Universyty of Mayland, 2002.

Escudero, L. F. **La simulación em La empresa**. Barraincúa: Deusto, 1973.

Europump; Hydraulic Institute. **Variable speed pumping. A guide to successful applications.** First edition. Bodmin, Cornwall: Elsevier, 2004.

Garcia, J.; Caldas, P. **Equipamentos de Superfície**. Salvador: Petrobras/Serec/Cen-Nor, 1989.

Hammersley, J. M.; Handscomb, D. C. **Monte Carlo methods**. London Methuen, 1964.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14224: **Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment**, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17776: **Petroleum and Natural Gas Industries Offshore Production Installations – Guidelines on Tools and Techniques for Hazard Identification and Risk Assessment**, 2000.

Junior, A. A. **Manutenção Preditiva (Usando Análise de Vibrações)**. Barueri: Manole, 2004.

Kececioglu, D. **Reliability Engineering Handbook. Englewood Cliffs**. N. J.: Printece-Hall,Inc, 1991.

Kececioglu, D. **Reliability of Aircraft Splines with or without a Wear Introduction Period**. New York, 1993.

Kececioglu, D.; Haugen, E. B. **Interactions Among the Various Phenomena Involved in the Design of Dynamic and Rotary Machinery and their Effects on Reliability**. New York, 1993.

Kumamoto, H. J. **Probalistic Risk Assessment and Scientists**. IEEE (The Institute of Electrical and Eletronics Engineers, Ins), 1996.

Lafraia, J. **Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade**. Qualitymark, 2001.

Law, A. M.; Kelton, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**, 1997.

Leitch, R. D. **Reliability Analysis for Engineers: An Introduction**. Oxford University Press, 1995.

Lima, E. P. **Mecânica das Bombas**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

Lustosa, P. R. B.; Ponte, V. M. R.; Dominas, W. R. Simulação. In: Corrar, L. J.; Theóphilo, C. R. (Coord.). **Pesquisa operacional para decisão em contabilidade e administração: contabilometria**. São Paulo: Atlas, 2004.

Mattos, E. E.; Falco, R. **Bombas industriais**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

Moubray, J. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**. Aladon, 2000.

Moubray, J. **Reliability-Centered Maintenance**. Industrial Press, 2001.

Mykytka, E. F.; Litko, J. R. Simulatin Modeling for Reliability Analysis. **Tutorial Notes, Annual Reliability and Maintainability Symposium**, 2000.

Nascimento, A. M.; Zucchi, A. L. **Modelos de simulação**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1997. 40 p. Monografia – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OREDA. **Offshore Reliability Data**. SINTEF, 2009.

Palady, P. **Análise de Modos de Falhas e Efeitos**. IMAM, 1997.

PETROBRAS, Revista Comemorativa, **Petrobras**, p. 09-10, 2005.

Reis, S. G.; Martins, E. Planejamento do balanço bancário: Desenvolvimento de um modelo matemático de otimização do retorno econômico ajustado ao risco. **Revista Contabilidade & Finanças**, São Paulo, v. 15, n 26, p.: 58-80, Maio/Agosto, 2001.

ReliaSoft Brasil. **Guia de Treinamento**, 2006.

ReliaSoft Corporation. **An Application of BlockSims Log of Simulations**. ReliaSoft Corporation, 2009.

ReliaSoft Corporation. **System Analysis Reference: Reliability, Availability and Optimization**. ReliaSoft Publishing, 2007.

ReliaSoft Corporation. **Weibull++ 6.0 Software Package**. Tucson, AZ, 2000.

Render, B.; Stair Jr., R. M. **Quantitative analysis for management**. Prentice-Hall, 1977.

Rosa, A. J.; Carvalho, R. d.; Xavier, J. A. **Engenharia de Reservatório de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

Rossi, N. C. **Fundamentos de Produção**. Salvador: Petrobras/ Serec/Cen-Nor, 1989.

Santos, A. F. **Gerenciamento da Confiabilidade em Projetos de Material Rodante Ferroviário**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Mestre em Engenhari. USP. São Paulo, 2007.

Scapin, C. A. **Análise Sistêmica de Falhas**. Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

Silva, J. T.; Ivo, L. A.; Oliveira, P. S.; Pellegrino, S. L. **Bombas centrífugas passo a passo (Manual prático de manutenção e operação)**. Salvador: Turbothec, 2002.

Sivini, P. G. **Desenvolvimento de banco de dados de Confiabilidade: Uma aplicação em estações redutores de pressão de gás natural**. Recife: UFPE, 2006.

Smith, C. **Mechanics of Secondary Oil Recouvery**. Florida: Robert E. Krieger Publishing, 1975.

Souza, G. F. **Análise de Confiabilidade de Sistemas Complexos**. Símposio Internacional de Confiabilidade – SIC, 2010.

Stephenson, M. **Components of Producerd Water: a complilation of industry studies**. Journal of Petroleum Tecnology, p. 548-603, 1992.

Thomas, E. J. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

Tsutiya, M. T. **Abastecimento de água**. 1ª Ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

APÊNDICE A

Sistema de Injeção de Água Produzida para Elevação de Petróleo

Sistema para injeção de água produzida é descentralizado e chamado de Estação de Injeção de Água, é composto por:

- Função: Injeção d'água produzida para recuperação secundária de petróleo;
- Localização: Mossoró, Canto do Amaro - Rio Grande do Norte;
- Parâmetros da estação: Estação possui sistema supervisório de monitoramento da operação;
- Sistema de filtragem de água conforme o diagrama da figura 26.
- Pressão de injeção de 120 Kgf/cm²_g.
- Possui 02 (duas) Bombas de Injeção (A/B) com vazão individual de 350 m³/h cada e pressão de descarga de 120 Kgf/cm²_g;
- Possui 04 (quatro) Bombas de Injeção (A/B/C/D) com vazão individual de 88 m³/h cada e pressão de descarga de 120 Kgf/cm²_g que serão relocadas da atual Estação de Injeção de Alto da Pedra;
- Possui 04 (quatro) filtros tipo cesto simplex (FA/FB/FC/FD) a serem instalados no *header* de sucção das bombas de injeção de água A/B/C/D/E;
- Possui 01 (uma) bacia de contenção com volume de 145 m³;
- Possui 02 (duas) bombas (A1/B1) para esgotamento da bacia;
- Possui 01 (uma) bomba (BP) para pressurização dos lançadores de pig: localizados no *Manifold* de Injeção de Água.

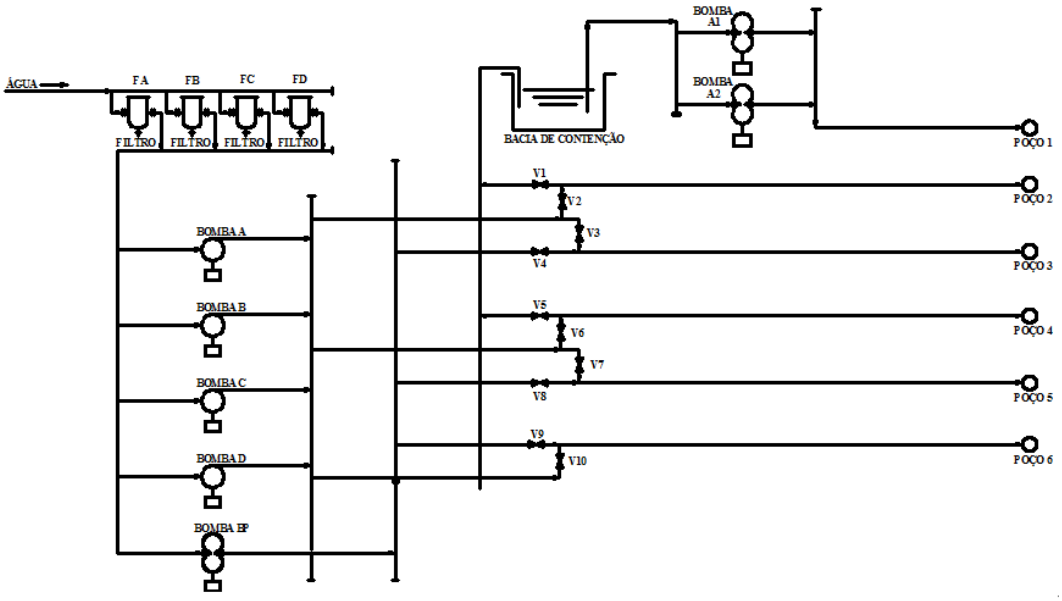


Figura 28 - Fluxograma de um sistema de injeção de água

Descrição do equipamento

Bomba centrífuga de alta pressão de múltiplos estágios com carcaça seccionada verticalmente ao eixo.

- A carcaça é composta pelo o corpo de sucção e pressão.

- Sobre os corpos de pressão e sucção são montados os selos responsável pela vedação e a caixa de mancais que suporta o eixo.

- Encontra-se na carcaça o dispositivo de equilíbrio axial responsável pelo alívio do empuxo axial.

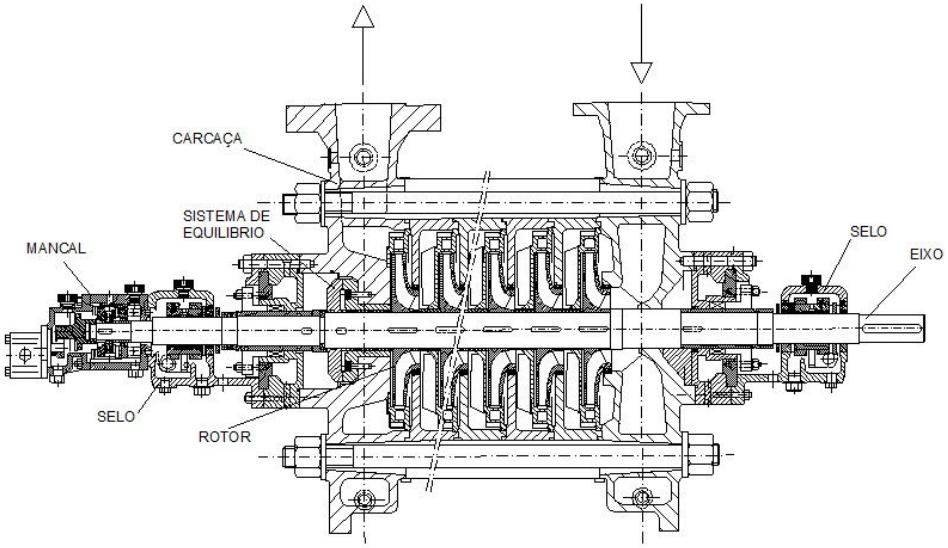


Figura 29 - Bomba centrífuga de múltiplos estágios.

A bomba é montada sob skid, conforme está representado na figura (28).

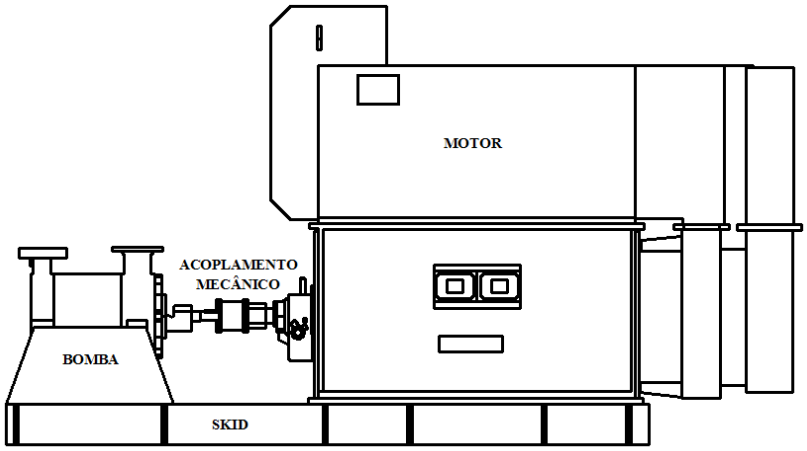


Figura 30 - Conjunto motor-bomba.

Dados de operação da bomba

- Vazão Nominal: 350 m³
- Pressão sucção: 101,9 kgf/cm²
- Altura manométrica: 1190
- Pressão de descarga: 1178 Kpa
- NPSH: 19,77

- Temperatura de bombeamento: 40°c máx.
- Pressão de vapor: 7,25 Kpa;
- Viscosidade: 0,65
- Taxa de partículas: 200 μm
- Local: Externo
- Clima: Tropical
- Atividade: Nível do Mar
- Atmosfera: Marítima
- Rotação: 3567 rpm
- Diâmetro do rotor: 328 mm
- Potência nominal: 1497,7 Kw
- Eficiência: 76,5 %
- Fluxo mínimo: 172,5 m^3/h
- Região de operação preferida: 276 a 379,5 m^3/h
- Região de operação permitida: 172,5 a 414 m^3/h

Logística Operacional

Tomando-se por base a aquisição peças e acessórios no mercado nacional e no mercado internacional de equipamentos para indústria do petróleo:

- Tempo de aquisição no mercado nacional: 60 dias.
- Tempo de aquisição no mercado internacional: 180 dias.
- Tempo de reparo no campo: 15 dias.

APÊNDICE B

Outras possibilidades de estudo com uso do FTA e FMEA

As possibilidades de estudo com uso do FTA e FMEA são inúmeras,como exemplo será feito o estudo da causa raiz de um dos itens motivadores da árvore de falha da Bomba Centrífuga (**Falha do Selo Mecânico**). Nesse caso, inverte-se a seqüência da metodologia, e faz-se primeiro o estudos das hipóteses de falhas na FTA e depois a FMEA para avaliar os impactos destas falhas.

Elaboração da FTA

Seleção do Evento Topo

O evento topo escolhido foi a **Falha do Selo Mecânico**.

Fatores Contribuintes

- **Vedação**

Hipóteses Nível 1:

- **Lubrificação**
- **Refrigeração**
- **Projeto**
- **Manutenção**

Hipóteses Nível 2 Causa raiz:

- **Aquecimento;**
- **Vazamento;**
- **Erro de projeto;**
- **Entupimento;**
- **Presença de sólidos;**
- **Face irregular;**
- **Mudança de processo;**
- **Falta de procedimento;**
- **Qualificação da mão de obra;**

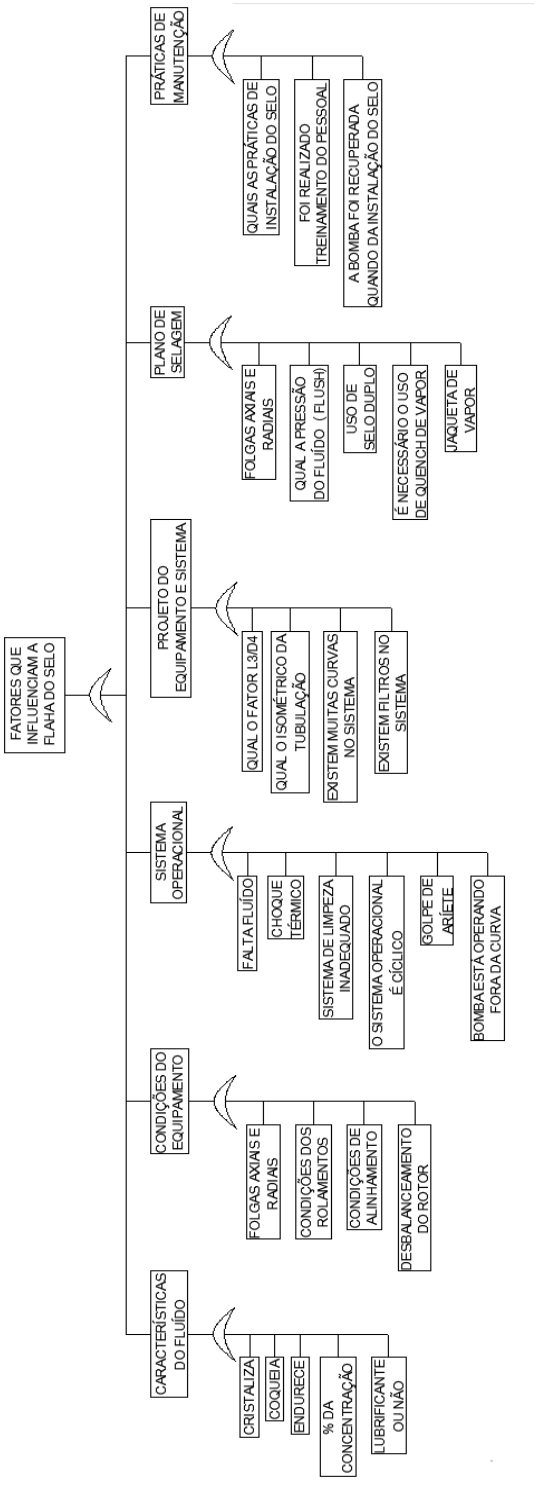
Hipóteses Nível 3 - Causa raiz:

Conforme o modo causas da falha, várias possibilidade de causa raiz podem ser investigadas, como:

- Cristaliza;
- Coqueia;
- Endurece;
- Concentração de particulados;
- Fluído não lubrificante;
- Fluído não Refrigerante;
- Folgas axias e radiais;
- Condições dos rolamentos;
- Condições de alinhamento;
- O rotor está desbalanceado;
- Erro de procedimento de manutenção;
- Falta de fluído;
- Choque Térmico;
- Sujeira;
- Golpes de aríete;
- Bomba fora do BEP;
- Isométrico da tubulação mau dimensionados ;
- Filtros no sistema mau dimensionados;
- Pressão do fluído (flush).

Vide árvore de falha do selo da página (151).

ÁRVORE DE FALHA DO SELO MECÂNICO DE BOMBA CENTRIFUGA



ANEXOS A

Tabela 5 - B.1 - Exemplo de Categorias de Frequência

Categoria de freqüência	Denominação	Descrição
5	Freqüente	Esperado ocorrer várias vezes durante a vida útil da instalação.
4	Provável	Esperado ocorrer mais de 1 vez durante a vida útil da instalação.
3	Ocasional	Possível ocorrer até 1 vez durante a vida útil da instalação.
2	Remota	Não esperado ocorrer durante a vida útil da instalação, apesar de haver referências históricas.
1	Extremamente Remota	Conceitualmente possível, porém extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil da instalação. Sem referências históricas.

Fonte: Norma Petrobras N-2781

Tabela 6 - B.2 - Exemplo de Categorias de Severidade

Categoria de severidade	Denominação	Pessoas	Patrimônio	Meio ambiente	Operacionalidade
5	Catastrófica	Incapacitação total definitiva ou acidente fatal.	Danos materiais cujos valores econômicos para realizar ações reparadoras sejam muito elevados comparados com o custo de aquisição.	Impacto ambiental de difícil reversão, mesmo com ações mitigadoras, e de grande magnitude e extensão (além dos limites do empreendimento) com potencial de afetar as partes Interessadas.	Mais que 30 dias de parada
4	Crítica	Incapacitação parcial definitiva ou de lenta reversão.	Danos materiais cujos valores econômicos para realizar ações reparadoras sejam elevados comparados com o custo de aquisição.	Impacto de grande magnitude, reversível com ações mitigadoras, mas restrita as áreas adjacentes da Unidade.	15 dias de parada
3	Moderada	Acidente com afastamento, por um período maior que 15 dias.	Danos materiais cujos valores econômicos para realizar ações reparadoras sejam moderados comparados com o custo de aquisição.	Impacto de magnitude considerável, porém reversível com ações mitigadoras, atingindo apenas áreas internas da Unidade.	7 dias (1 semana) de parada
2	Marginal	Acidente com afastamento, por um curto período de tempo (menor que 15 dias).	Danos materiais cujos valores econômicos para realizar ações reparadoras sejam reduzidos comparados com o custo de aquisição.	Impacto de magnitude desprezível, porém reversível com ações mitigadoras, atingindo apenas áreas internas da Unidade.	2 dias de parada
1	Desprezível	Acidente sem afastamento ou incidente. Ex.: pequenos cortes, hematomas etc.	Danos materiais cujos valores econômicos para realizar ações reparadoras sejam desprezíveis comparados com o custo de aquisição.	Impacto de magnitude desprezível para o meio ambiente / restrito ao local de ocorrência, totalmente reversível com ações imediatas, não afeta partes interessadas.	Algumas horas de parada

Fonte: Norma Petrobras N-2781

Tabela 7 - B.3 - Exemplo de Categorias de Detecção

Categoria de detecção	Denominação	Critério
4	Muito Baixa	Inexistência de recursos para detecção (exemplo: não há presença de nenhum dos recursos citados nas categorias 1, 2 e 3).
3	Baixa	Existência de poucos recursos para detecção (exemplo: apenas percebido por sentidos humanos).
2	Moderada	Existência de recursos para inspeção (exemplo: equipamentos de medição).
1	Alta	Existência de recursos para inspeção e monitoração (exemplo: sistema "on-line" de monitoramento).

B.8 A criticidade é o resultado da combinação das categorias relacionadas no B.7. Exemplos de categorias de criticidade, relacionando apenas as categorias de freqüência e severidade, são mostrados nas Tabelas B.4 e B.5.

Fonte: Norma Petrobras N-2781

Tabela 8 - B.4 - Exemplo de Categoria de Criticidade

Categoria de criticidade	Denominação	Critério
A	Intolerável	Métodos alternativos devem ser considerados para reduzir a probabilidade de ocorrência e, adicionalmente, as conseqüências, de modo que a criticidade seja reduzida a categorias aceitáveis.
B	Indesejável	Medidas adicionais devem ser avaliadas com o objetivo de obter-se uma redução da criticidade, implementando-se aquelas consideradas praticáveis.
C	Tolerável	Não há necessidade de medidas adicionais. A monitoração é necessária para assegurar que a criticidade seja mantida.
D	Desprezível	Não há necessidade de medidas adicionais.

Fonte: Norma Petrobras N-2781

Tabela 9 - B.5 - Exemplo de Matriz de Criticidade

Categoria de freqüência	Categoria de severidade 1	2	3	4	5
5	C	B	A	A	A
4	C	B	B	A	A
3	C	C	B	B	A
2	D	C	C	B	B
1	D	D	C	C	B

B.9 No relatório da FMECA são apresentadas as tabelas das categorias utilizadas e as planilhas devidamente preenchidas, incluindo todas as ações, observações e recomendações geradas, citando o órgão responsável pela implementação de cada uma. Além disto, todas as informações e documentos (fluxogramas de processo, fluxogramas de engenharia, folhas de dados, histórico de falhas etc.) utilizados fazem parte do relatório como anexo, bem como a relação de participantes da equipe de trabalho.

NOTA O relatório é emitido em arquivo eletrônico compatível com os aplicativos de editoração de texto e de planilha utilizados na PETROBRAS.

Fonte: Norma Petrobras N-2781

ANEXOS B

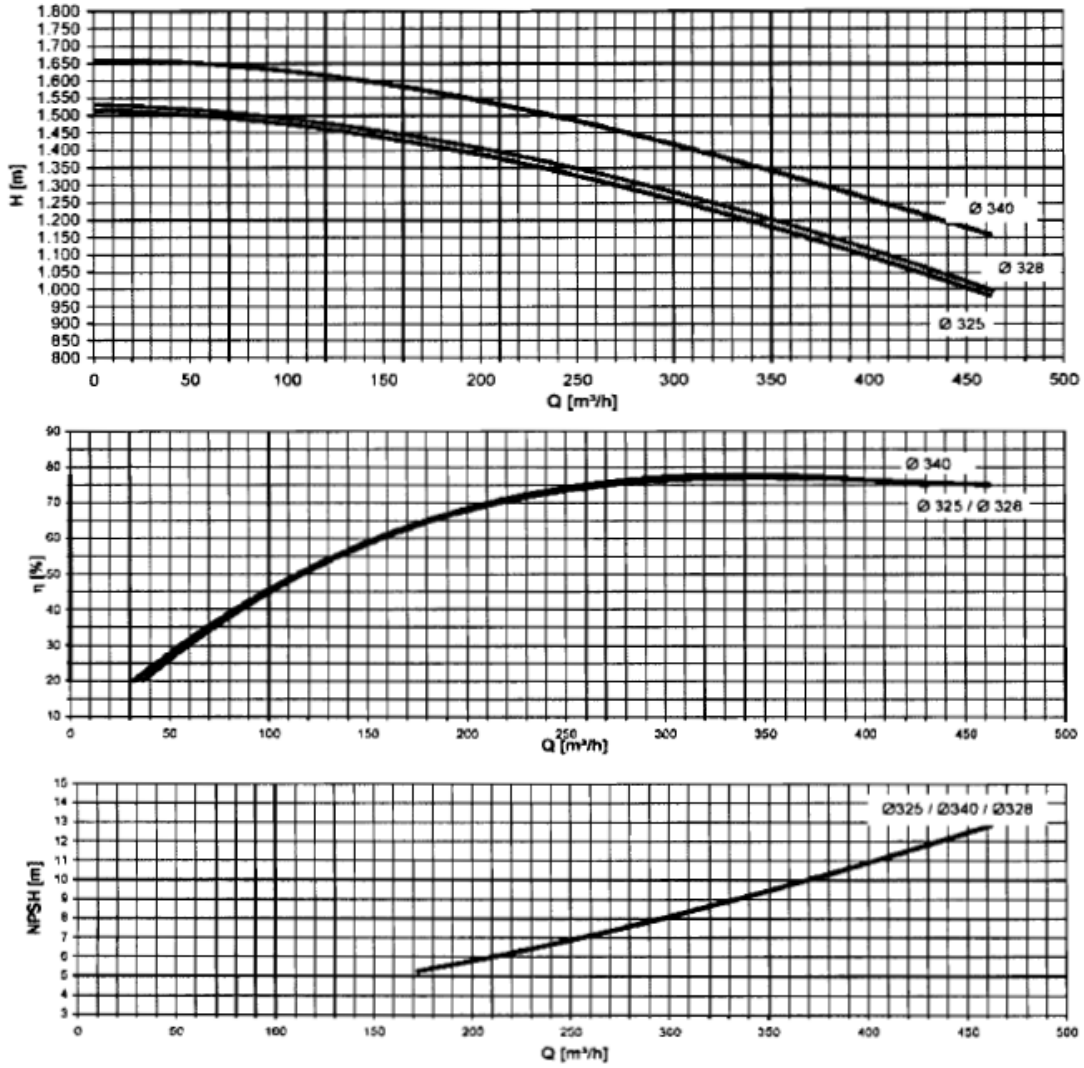


Figura 31 - Curvas de desempenho da bomba

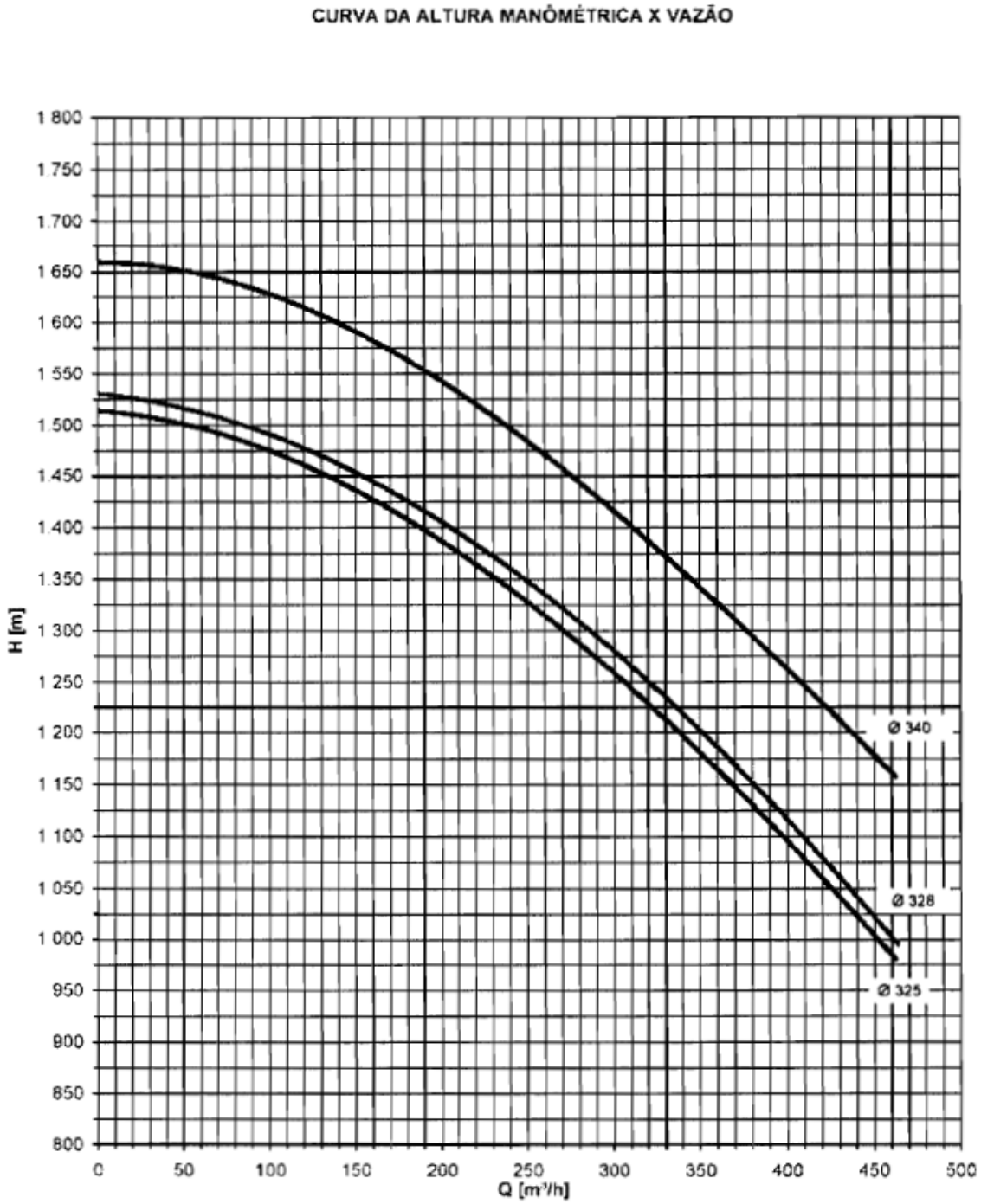


Figura 32 - Curvas altura manométrica versus vazão

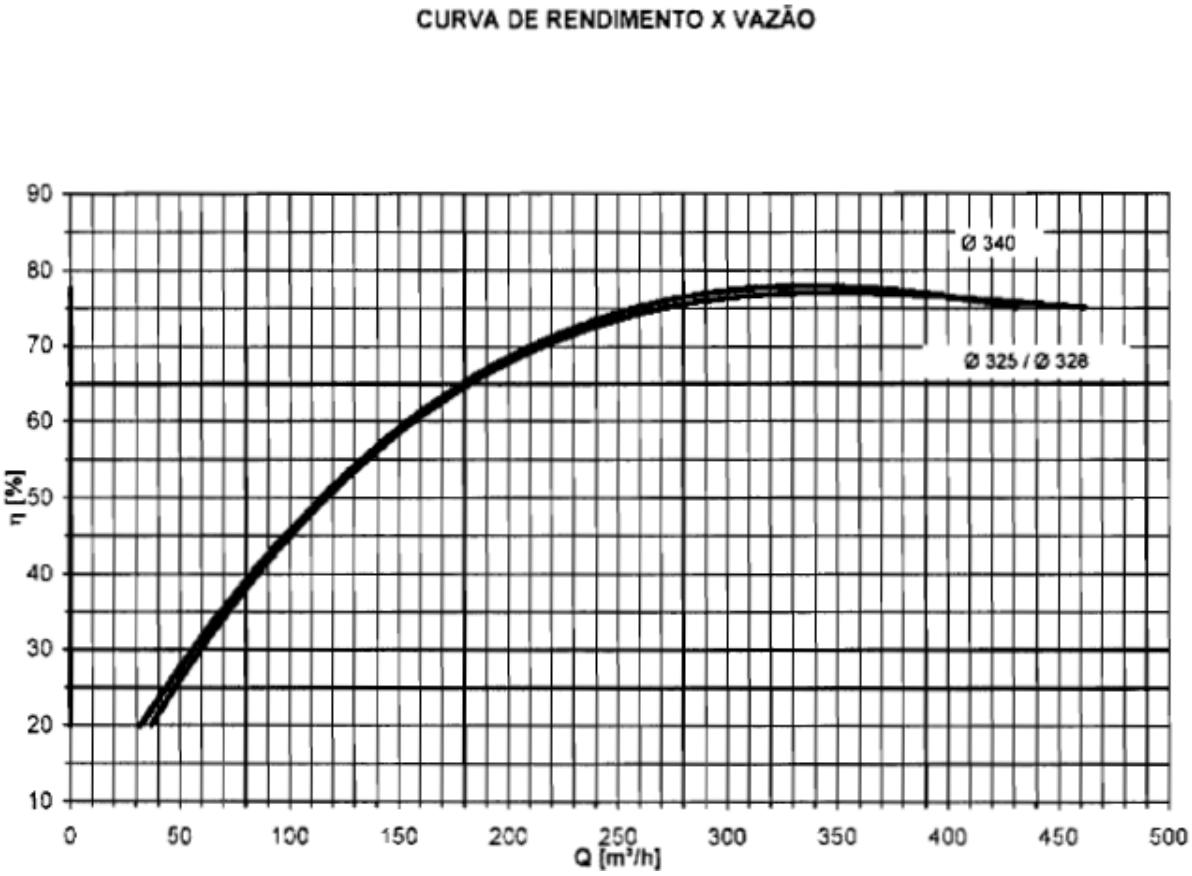


Figura 33 - Curva rendimento versus vazão

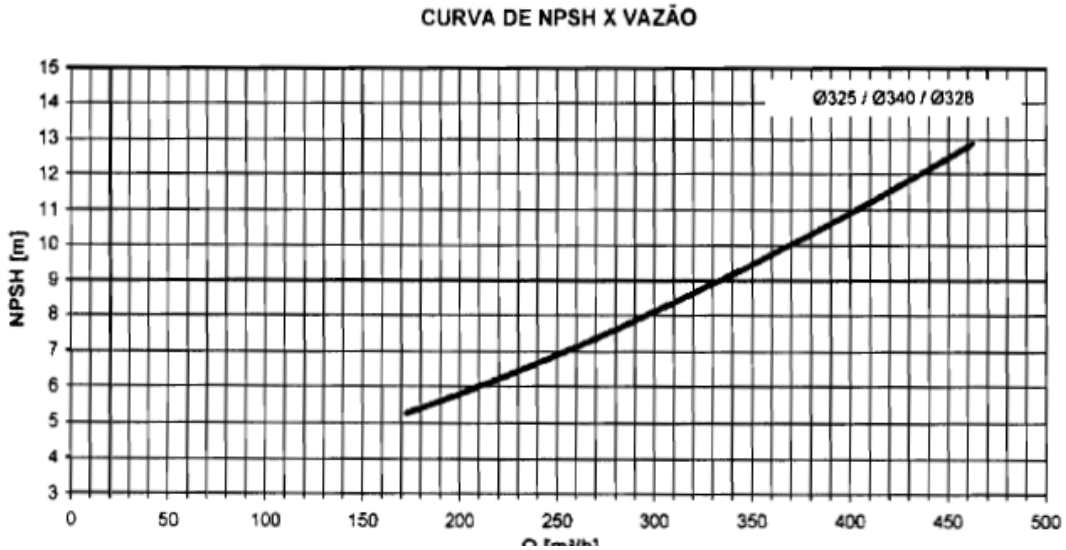
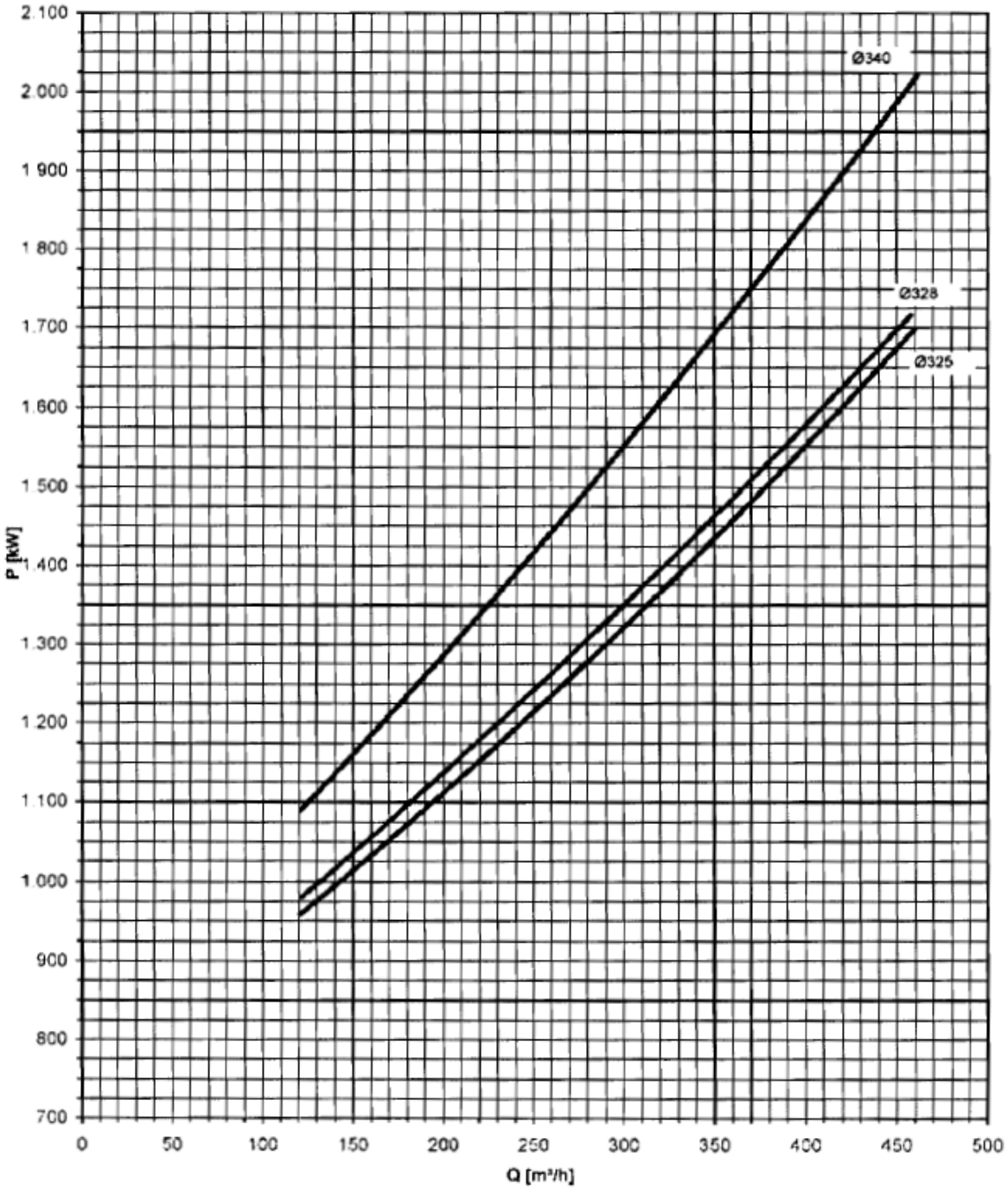


Figura 34 - Curvas NPSH versus vazão

CURVA DA POTÊNCIA X VAZÃO