

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

MARCO ANTONIO TOLEDO

**ANÁLISE DE FALHAS BASEADA EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE EM
UMA BOMBA CENTRÍFUGA NO PROCESSO RELIQUEFAÇÃO DE AMÔNIA
DE UMA PLANTA PETROQUÍMICA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2018**

MARCO ANTONIO TOLEDO

**ANÁLISE DE FALHAS BASEADA EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE EM
UMA BOMBA CENTRÍFUGA NO PROCESSO RELIQUEFAÇÃO DE AMÔNIA
DE UMA PLANTA PETROQUÍMICA**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

Co-orientador: Eng. Leonardo Fagotti

**CURITIBA
2018**



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE FALHAS BASEADA EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE EM UMA BOMBA
CENTRÍFUGA NO PROCESSO RELIQUEFAÇÃO DE AMÔNIA DE UMA PLANTA PETROQUÍMICA

por

MARCO ANTONIO TOLEDO

Esta monografia foi apresentada em 05 de outubro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Carlos Henrique Mariano, Dr. Eng.
Professor Orientador – UTFPR

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
Membro Titular da Banca – UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Membro Titular da Banca – UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho a minha esposa Rosana e aos meus sobrinhos Gustavo, Ryan, Bárbara e Leonardo por compreenderem (ou não) meus momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Nesta importante e especial fase da minha vida, não posso deixar de agradecer a Deus por toda força, ânimo e coragem que me ofereceu para ter alcançado mais esta meta.

Certamente estes parágrafos não irão expressar a gratidão à todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase. Portanto, peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Destarte agradeço:

À instituição, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, quero deixar especial agradecimento por ter me recebido de braços abertos e com todas as condições que me proporcionaram dias de aprendizagem muito ricos.

Aos professores reconheço um esforço gigante com muita paciência e sabedoria. Foram eles que me deram recursos e ferramentas para evoluir um pouco mais todos os dias.

É claro que não posso esquecer da minha família e amigos, porque foram eles que me incentivaram e inspiraram através de gestos e palavras a superar todas as dificuldades.

Ao professor Dr. Emerson Rigoni que de forma bastante prestativa sempre atendeu prontamente a mim e a todos os demais alunos, esclarecendo de maneira bastante clara a nossas dúvidas.

Agradecimento especial quero deixar ao meu orientador o professor Dr. Carlos Henrique Mariano pela sua disponibilidade e apoio, fundamentais para realizar e prosseguir este estudo.

Ao meu amigo, colega de trabalho e co-orientador Engenheiro Leonardo Fagotti pela disposição do seu tempo e conhecimento em confiabilidade que muito me ajudou e, devido à nossa proximidade, foi fundamental para a execução deste trabalho.

Ao meu, também amigo e colega de trabalho Fabiano Parizotto dos Santos que disponibilizou seu tempo e material auxiliando muito este estudo.

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original” (Albert Einstein)

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

Resumo

TOLEDO, Marco Antonio. Análise de falhas baseada em engenharia da confiabilidade em uma bomba centrífuga no processo reliquefação de amônia de uma planta petroquímica. 2018. 58 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Uma planta industrial de insumos fertilizantes, em operação desde de 1982, apresenta dentre vários equipamentos, duas bombas centrífugas de amônia responsáveis pela transferência de amônia excedente não utilizada na unidade de uréia, para o tanque de estocagem. Essas bombas são de extrema importância para o processo, pois sua falha pode implicar em perda de contenção de produto (neste caso amônia), causando contaminação ambiental, prejuízo financeiro significativo devido à parada de produção e risco elevado de acidentes com significativa severidade à saúde e a vida das pessoas. Logo, através dos dados obtidos com o uso das ferramentas da confiabilidade, verificou-se a necessidade de revisão de alguns procedimentos operacionais e de manutenção devido ao histórico de indisponibilidade deste sistema em função das falhas destas bombas. Portanto, diante do significativo aumento no número de intervenções nestes equipamentos, e, por consequência, aumento na indisponibilidade do sistema devido à perda da função. Ficou evidenciada a necessidade de um estudo mais aprofundado das causas destes distúrbios, sendo o objetivo deste trabalho fazer uma análise dos dados de vida do equipamento, parametrizar os valores obtidos e, através dos Métodos Para Análise de Falhas e Simulação via Diagramas de Blocos de confiabilidade, investigar as causas do aumento de intervenções e retrabalhos executados no equipamento, corrigir os eventos causadores e prever o momento ideal da manutenção preventiva associado ao modo correto de operação da bomba.

Palavras chaves: Bomba de amônia. Bomba centrífuga. Análise de dados de vida. Diagramas de blocos de confiabilidade. Simulação.

Abstract

TOLEDO, Marco Antonio. Failure analysis based on the reliability of a centrifugal pump in the process of ammonia reliquefaction of a petrochemical plant. 2018. 58 sheets. Monography (Specialization in Reliability Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2018.

An industrial fertilizer plant, in operation since 1982, has two centrifugal ammonia pumps, which are responsible for the transfer of unused surplus ammonia from the urea unit to the storage tank. These pumps are of extreme importance for the process, since their failure can imply loss of product containment (in this case ammonia), causing environmental contamination, significant financial loss due to production stoppage and high risk of accidents with significant health and people's life. Therefore, through the data obtained with the use of reliability tools, it was verified the need to review some operating and maintenance procedures due to the history of unavailability of this system due to the failure of these pumps. Therefore, due to the significant increase in the number of interventions in these equipments, and, consequently, an increase in the unavailability of the system due to the loss of function. It was evidenced the necessity of a more detailed study of the causes of these disorders, being the objective of this work to make an analysis of the life data of the equipment, to parameterize the obtained values and, through the Methods for Failure Analysis and Simulation via Block Diagrams of reliability , investigating the causes of increased interventions and rework performed on the equipment, correcting the causative events, and predicting the optimal timing of preventive maintenance associated with the correct mode of pump.

Keywords: Ammonia pump. Centrifugal pump. Life data analysis. Reliability block diagrams. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Vista da Bomba Com a Tubulação de Balanço e Arrefecimento do Motor – Fonte: Autor – 2018 | 19 |
| Figura 3.1 – Modelo de Uma Árvore de Falha – Fonte Rigoni: (2014) | 24 |
| Figura 3.2 – Ilustração da Curva da Banheira – Fonte: CATSI – China Association For Technical Supervision Information | 25 |
| Figura 4.1 – Árvore de eventos elaborada a partir dos levantamentos obtidos – Fonte: Autor – 2018 | 33 |
| Figura 4.2 – Tubo de Encapsulamento – 19-1101-06 – Foto RTA elaborada em 2017/0018 | 34 |
| Figura 4.3 – Junta do Lado Oposto a Caixa de Ligação – Foto RTA elaborada em 2017/0018 | 35 |
| Figura 4.4 – Detalhes dos Danos Nos Mancais LOA – Foto RTA elaborada em 2017/0018 | 38 |
| Figura 4.5 – 1ª Parte da Árvore de Falhas – Fonte: Autor – 2018 | 39 |
| Figura 4.6 – 2ª Parte da Árvore de Falhas – Fonte: Autor – 2018 | 39 |
| Figura 4.7 – 3ª Parte da Árvore de Falhas – Fonte: Autor – 2018 | 40 |
| Figura 4.8 – Bombas Com os Sensores de Temperaturas Instalados – Fonte: Autor – 2018 | 47 |
| Gráfico 3.1 – Weibull pdf com $\beta < 0$, $\beta > 0$ e $\beta = 0$ – Fonte http://www.reliawiki.org (adaptado) | 28 |
| Gráfico 3.2 – Weibull pdf com η variando para $\beta > 0$ – Fonte http://www.reliawiki.org (adaptado) | 29 |
| Gráfico 4.1 – Curva Densidade de Probabilidade – Fonte: https://reliabilityanalyticstoolkit | 44 |
| Gráfico 4.2 – Curva de Confiabilidade – Fonte: https://reliabilityanalyticstoolkit | 45 |
| Quadro 4.1 – Evidências Levantadas na Análise por Árvore de Falhas – elaboração GT | 40 |
| Quadro 4.2 – Parâmetros Obtidos pela Distribuição Weibull – Fonte https://reliabilityanalyticstoolkit | 44 |
| Quadro 4.3 – Ações futuras e ações aplicadas à bomba 19-1102-01/06 – elaboração GT | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|---|
| 19-1001 | Compressor de Amônia |
| 19-1101-01 | Bomba Principal de Amônia |
| 19-1101-06 | Bomba Reserva de Amônia |
| 19-1101-71 | Motor da Bomba Principal de Amônia |
| 19-1101-76 | Motor da Bomba Reserva de Amônia |
| 19-1102-01 | Bomba Principal de Amônia |
| 19-1102-06 | Bomba Reserva de Amônia |
| 19-2002 | Vaso na Sucção da Bomba de amônia 19-1102-01/06 |
| 19-2003 | Vaso na Sucção da Bomba de amônia 19-1101-01/06 |
| U-19 | Unidade de Refrigeração de Amônia |
| β | Parâmetro de Forma |
| η | Vida Característica |
| γ | Parâmetro de Localização |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|--|
| AAF | Análise de Árvore de Falhas |
| ED | Equipamentos Dinâmicos |
| EE | Equipamentos Estáticos |
| EI | Elétrica Industrial |
| ETA | <i>Event Tree Analysis</i> |
| FTA | <i>Faut Tree Effect Analysis</i> |
| GT | Grupo de Trabalho |
| LA | Lado do Acoplamento |
| LOA | Lado Oposto ao Acoplamento |
| LSAL | <i>Level Switch Alarm Low</i> |
| LT | <i>Level Transmitter</i> |
| MI | Manutenção Industrial |
| PDF | Probabilidade de Falhas |
| PE | Padrão de Execução |
| PN | Painel |
| PPG 2018 | Parada Programada Geral 2018 |
| RTA | Relatório de Tratamento de Anomalia |
| SAP | <i>Systeme, Anwendungen und Produkte</i> |
| TPO | Técnico de Planejamento Operacional |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|-----------------------|--|
| OREDA | <i>Offshore and Onshore Reliability Data</i> |
| PI – <i>Data Link</i> | Sistema Eletrônico de Intertravamento |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 PREMISSAS DA PESQUISA..... | 13 |
| 1.2 OBJETIVOS | 13 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 13 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 15 |
| CAPÍTULO 2 – BOMBAS CENTRÍFUGAS | 17 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 2.2 COMPLEXIDADE DINÂMICA DO SEU FUNCIONAMENTO | 18 |
| 2.2.1 Objetivo do Estudo..... | 18 |
| 2.3 SISTEMA REDUNDANTE..... | 20 |
| 2.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO..... | 20 |
| CAPÍTULO 3 – CONFIABILIDADE DE SISTEMAS | 22 |
| 3.1 INTRODUÇÃO..... | 22 |
| 3.2 ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS..... | 23 |
| 3.3 ANÁLISE DA ÁRVORE DE EVENTOS..... | 23 |
| 3.4 ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA PELA ANÁLISE WEIBULL | 24 |
| 3.4.1 Distribuição <i>Weibull</i> 3 Parâmetros..... | 26 |
| 3.4.2 Distribuição <i>Weibull</i> 2 Parâmetros..... | 26 |
| 3.4.3 Distribuição <i>Weibull</i> 1 Parâmetro..... | 27 |
| 3.4.3.1 Efeitos do Parâmetro Beta (β) na <i>PDF</i> | 27 |
| 3.4.3.2 Efeitos do Parâmetro Eta (η) na <i>PDF</i> | 28 |
| 3.4.3.3 Efeitos do Parâmetro Gama (γ) na <i>PDF</i> | 29 |
| 3.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS..... | 30 |
| 3.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO..... | 30 |
| CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS EVENTOS | 31 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 31 |
| 4.2 DESCRIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS..... | 31 |
| 4.2.1 Descrição das Ocorrências..... | 32 |
| 4.3 ÁRVORE DE EVENTOS..... | 33 |
| 4.4 ANÁLISE DAS FALHAS..... | 33 |
| 4.4.1 Evidências do Primeiro e Segundo Evento..... | 34 |
| 4.4.2 Evidências do Terceiro Evento..... | 34 |
| 4.5 CONSTATAÇÕES DESTES TRÊS EVENTOS..... | 35 |
| 4.5.1 Causa Contribuinte | 36 |
| 4.6 AÇÕES CORRETIVAS REALIZADAS..... | 36 |
| 4.6.1 Ações de Melhorias..... | 37 |
| 4.7 QUARTO EVENTO OBSERVADO..... | 37 |
| 4.8 ÁRVORE DE FALHAS..... | 38 |
| 4.9 CONCLUSÕES | 42 |
| 4.10 ANÁLISE DE <i>WEIBULL</i> | 43 |
| 4.11 COMPARAÇÃO DOS DADOS..... | 46 |
| 4.12 CONCLUSÃO DO GT..... | 46 |
| 4.13 NOVAS AÇÕES DE MELHORIA..... | 46 |
| 4.13.1 Ações Principais | 47 |
| 4.13.2 Demais Ações..... | 47 |
| 4.13.3 Implementações Futuras | 47 |

| | | |
|------|---|-----------|
| 4.14 | SÍNTESE DE CONCLUSÃO DO CAPÍTULO | 51 |
| | CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO..... | 53 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO | 53 |
| 5.2 | DIFICULDADES | 54 |
| 5.3 | DESCOBERTA DE UM NOVO MODO DE GESTÃO..... | 54 |
| 5.4 | PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS..... | 54 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as evidências da necessidade de utilização de ferramentas adequadas para um estudo aprofundado das causas geradoras de eventos que resultam em parada de produção e aumentam os riscos de acidentes.

1.1 PREMISSAS DA PESQUISA

Este trabalho tem por objetivo estudar as causas dos problemas apresentados nas bombas centrífugas da unidade de reliquefação de amônia. Uma vez que tal unidade é responsável pelas trocas térmicas de maior energia do complexo, se esta perder sua função, todo o processo de amônia e uréia, será interrompido e a retomada da produção requer consideráveis recursos como de matéria prima, horas trabalhadas entre outros, onerando significativamente os cofres da empresa.

Contudo, a substituição de tais equipamentos por equipamentos novos sem a correta identificação da causa da falha, certamente implicará em falhas recorrentes a médio e longo prazo, logo, antes de qualquer plano de ação (substituição da bomba ou mudança no processo de operação), um estudo de causa deverá ser feito.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

A partir da análise da Árvore de Falhas, propor um novo método auditável de manutenção e operação de forma a diminuir a frequência de necessidade de intervenção corretiva e criação de banco de dados para eventual necessidade de correções no plano de ação adotado.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos estão listados abaixo e serão trabalhados melhor detalhados nos respectivos capítulos:

- Organizar GT composto por equipe multidisciplinar;
- Pesquisar no histórico de manutenção os eventos que causaram os problemas de grande relevância e aqueles que resultaram num maior tempo de indisponibilidade do equipamento;
- Verificar se há relação destes eventos com o procedimento operacional seguido na unidade, se houve alguma mudança de projeto, material ou instalação;
- Elaborar Árvore de Eventos a partir dos fatos observados;
- Evidenciar suposto descumprimento dos procedimentos de manutenção, levando em conta que mesmo após períodos relativamente longos de parada onde, supostamente houve tempo hábil para uma intervenção relevante, os equipamentos apresentaram várias vezes os mesmos problemas;
- Elaborar Árvore de Falhas;
- Parametrizar os dados pelo método *Weibull*;
- Comparar a Análise dos Dados de Vida do equipamento com os dados do OREDA;
- Estudar o motivo das recorrências de intervenções para correções semelhantes;
- Elaborar plano de ação após evidenciadas as anomalias de natureza humana e mecânica;
- Estabelecer prazos para eventuais mudanças de procedimentos, materiais, alteração de processo e demais recomendações de melhoria.

1.3 JUSTIFICATIVA

Estas bombas tiveram sempre confiabilidade bastante satisfatória atendendo a demanda a que foram propostas, porém, a partir de 2012 não demonstraram mais a mesma performance de operação causando transtorno à

empresa, desconforto aos funcionários pelos distúrbios gerados entre operação e manutenção.

Dados mostram que no ano de 2017 a perda dessa função fez com que a planta deixasse de produzir 52,3 mil toneladas de uréia e 33,9 mil toneladas de amônia gerando prejuízos significativos aos cofres da empresa.

As origens do baixo desempenho permaneceram como uma incógnita por muito tempo, pois os levantamentos feitos até então apontavam que os manuais e procedimentos foram seguidos tanto pela manutenção quanto pela operação.

Logo, o presente estudo foi necessário para que, após identificada a causa do problema, ações fossem tomadas de forma a minimizar este cenário.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho tem o intuito de pesquisar no histórico de manutenção os fatos que causam os problemas de maior relevância onde houve maior tempo de indisponibilidade do equipamento, verificando se há relação destes com o procedimento operacional seguido na unidade, se houve alguma mudança de projeto, material ou instalação, uma vez que houve um aumento na frequência de ocorrência de problemas destas bombas, ocorrências estas que, devido a sua gravidade, indisponibilizaram a função por um período considerável. Pois mesmo contando com redundância, os dois equipamentos sofreram simultaneamente pane de natureza semelhante, o que resultou na parada do processo industrial da planta durante o período de intervenção para manutenção corretiva.

Portanto, após levantadas as principais falhas e estudar suas possíveis relações com a manutenção, operação ou projeto, avaliar a possibilidade de se antecipar ao problema focando na manutenção preditiva e preventiva estabelecendo-se uma correta rotina de intervenções e uma eventual mudança no procedimento operacional, verificando junto ao fabricante uma possível

mudança de projeto, tudo isso buscando o aumento da confiabilidade e consequentemente maior continuidade operacional da planta.

Utilizada a ferramenta de Análise de Árvore de Falhas (AAF), técnica esta que realiza uma análise de cima para baixo e busca identificar as causas da falha até sua causa raiz, representadas em um diagrama booleano por operadores lógicos *and* (e), *or* (ou) e *not* (não) de todas as possíveis combinações de causas desde o maior até o menor nível. Após esta análise, será avaliado o histórico de manutenção do equipamento utilizando a Análise de Dados de Vida ou análise de sobrevivência para verificar quais componentes sofreram maior desgastes ou se desgastaram com maior frequência. Por último foi analisada a confiabilidade da bomba antes da intervenção de 2012, após este ano onde a frequência das falhas teve expressivos aumentos e após o estudo realizado com as respectivas mudanças aplicadas.

CAPÍTULO 2

BOMBAS CENTRÍFUGAS

Neste capítulo será feita uma breve explicação do processo industrial, das características das bombas centrífugas, sua função e modo de operação.

2.1 INTRODUÇÃO

As bombas centrífugas foram idealizadas muito antes da invenção dos motores elétricos, sendo que a fonte de energia que fazia girar o rotor era o vento ou a roda d'água.

Acionada mecanicamente por um eixo rotativo, a rotação do rotor da bomba transfere energia para o fluido através das palhetas do rotor. O fluido presente na sucção entra no olho do rotor - uma cavidade de diâmetro menor, interna - a partir de onde escoam em direção ao diâmetro externo pelos canais formados entre as palhetas do rotor. O fluido deixa o rotor com considerável velocidade absoluta a parcela de energia cinética - que deve ser convertida em energia potencial de pressão. Isto é realizado nas partes não rotativas.

A forma mais frequente de recuperação de energia nas partes não rotativas é uma carcaça com formato espiral, conhecido como voluta, que termina em um bocal de recalque. Uma outra forma usual de dispositivo recuperador de energia é uma série de palhetas estáticas, chamada de difusor. O difusor com palhetas pode ser seguido de um canal de retorno - dirigindo o fluido a outro rotor - ou a um coletor espiral, muito semelhante a uma voluta.

A energia transferida pela bomba centrífuga ao fluido é função do diâmetro do rotor, da rotação de acionamento e do projeto do rotor. Se a descarga requer uma energia ainda mais alta que a fornecida pela bomba ao fluido, não há escoamento: o fluido é somente pressurizado.

Fonte: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAATt4AE/bombas-centrifugas>

2.2 COMPLEXIDADE DINÂMICA DO SEU FUNCIONAMENTO

Este equipamento foi inventado antes do motor elétrico, sendo inicialmente sua fonte de energia propulsora a roda d'água e sua aplicação nos engenhos da antiguidade era basicamente levar lama até determinado ponto através do seu rotor constituído de simples pás retas. Mesmo com o advento da indústria e indiscutível avanço da tecnologia este equipamento mantém seu princípio de funcionamento, porém, devido à exigência de cada processo, a modernidade nos coloca à disposição equipamentos mais robustos e confiáveis, contudo, isso requer atenção especial à manutenção preventiva visando segurança e continuidade operacional.

Fonte: <https://www.cepa.if.usp.br/energia>

2.2.1 Objetivo do Estudo

A bomba em questão, é um modelo que apresenta projeto horizontal com entradas axiais de sucção e descarga radial tomadas e construção modular de estágio único. Por serem completamente seladas e projetadas sem vedações de eixo, acionadas por meio de motores elétricos "enlatados", elas são usadas sempre que o fluido for agressivo, venenoso, líquidos inflamáveis, de temperaturas muito altas ou muito baixas, explosivos, valiosos, altamente voláteis devem ser bombeados.

Figura 2.1 Vista da bomba com a tubulação de balanço e arrefecimento do motor



Fonte: Toledo, Marco Antonio - 2018

Devido ao seu design, são praticamente livres de manutenção quando instaladas e operadas de acordo com as instruções do fabricante. Parte do fluxo principal da bomba é ramificado e bombeado para o lado de descarga passando por uma tubulação de menor diâmetro que resfria o motor como mostra a Figura 2.1. O fluxo parcial no costado do motor é de especial importância. Não serve apenas para dissipar o calor devido a perdas de energia do motor, mas também é necessário para a lubrificação dos mancais deslizantes e balanceamento de empuxo axial.

O eixo possui dois rolamentos deslizantes hidrodinâmicos, estes rolamentos deslizantes são lubrificados diretamente pelo meio de bombeamento. O motor enlatado que é um motor trifásico de gaiola, difere do motor convencional pelo estator. Este veda a câmara do rotor, que é preenchida com líquido da câmara do estator, que está cheia de ar. Ele protege o enrolamento de bombeamento agressivos, proporcionando transmissão magnética efetiva de energia ao rotor. Sob maior pressão do sistema, os anéis de reforço na seção autossustentada, entre as placas do estator e a tampa da caixa, fornecerem suporte adicional para as paredes finas.

O rotor de gaiola do motor é geralmente protegido contra a corrosão por uma espécie de *line* que reveste o rotor.

Fonte: Manual técnico de dados do equipamento - *Data sheet* – *HERMETIC-Pumpen GmbH*

2.3 SISTEMA REDUNDANTE

Este sistema opera de forma redundante, ou seja, há dois equipamentos idênticos instalados em paralelos, porém, um fica em *stand by* enquanto o outro opera vinte e quatro horas por dia. Contudo, para o equipamento que fica na reserva há uma rotina de operação onde este assume a função por um período de dez horas aproximadamente para que o mesmo não sofra o processo de deterioração justamente pelo fato de ficar parado e para que sejam feitas avaliações do seu funcionamento. Esta rotina deverá ser estabelecida de acordo com as características dos seus componentes que variam para cada equipamento e o planejamento da manutenção preditiva, onde dados são coletados e delineados. No caso específico desta bomba, esta rotina segue um período de quinze dias quando a bomba que estava em *stand by* é então colocada em operação, é feita a coleta de dados e após as dez horas o equipamento volta a ser parado até nova rotina de avaliação ou falha do equipamento titular.

2.4 SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados uma breve história da invenção, aplicação e evolução das bombas centrífugas, os conceitos de funcionamento da bomba e os dados técnicos específicos do equipamento em estudo extraídos do respectivo *datasheet*.

Feita uma descrição do modo de funcionamento, *stand by*, ao qual estas bombas estão dispostas e a periodicidade na qual o equipamento reserva assume a função com a finalidade de garantir a sua disponibilidade em

eventual necessidade para que se possa idealizar o cenário a que estes equipamentos estão submetidos.

CAPÍTULO 3

CONFIBILIDADE DE SISTEMAS

Neste capítulo será demonstrada a metodologia e ferramentas da confiabilidade R (do inglês *reliability*) empregada neste trabalho com citações de professores especialistas nesta área.

3.1 INTRODUÇÃO

Antes de se definir confiabilidade é importante destacar a noção de sistema empregada no trabalho, segundo o professor Dr. Carlos Amadeu Pallerosi no seu artigo “Confiabilidade, a quarta dimensão da qualidade”,

entende-se por sistema um conjunto de subsistemas e componentes combinados entre si de modo específico correspondentes a dados arranjos físicos (série, paralelos, compostos), para atingir as funções operacionais desejadas com custos, performance e confiabilidade que satisfaçam as necessidades do usuário final. O resultado das combinações dos arranjos físicos corresponde a um componente equivalente que representa o comportamento confiabilístico do sistema, ou seja, a consideração das confiabilidades de cada item em particular, com suas diferentes probabilidades de falhas ao longo da duração (uso). (Pallerosi, 2007).

Ainda segundo professor Pallerosi

a medida da importância de um dado componente é definida por um índice que considera sua influência individual no valor da confiabilidade do sistema. Este índice é definido como importância da confiabilidade e quanto maior o valor deste índice maior sua influência no sistema de melhora. Portanto, é conveniente sua avaliação prévia para concentrar esforços de melhoria onde necessário. Para cada componente, é fundamental o conhecimento da distribuição de falhas e sua correspondente posição no sistema (arranjo em série, paralelo, etc) (Pallerosi - 2007).

Logo, pode-se concluir que além das ferramentas adequadas de confiabilidade, conhecimento dos dados do equipamento em estudo é essencial para um trabalho adequado.

3.2 ANÁLISE DA ÁRVORE DE EVENTOS

Com o objetivo de estudar o que exatamente ocorreu com as bombas em estudo e, em qual cenário se encontrava tal sistema e quais foram as consequências das falhas, foi montado um Grupo de Trabalho (GT) formado por uma equipe multidisciplinar onde foram analisados todos os relatórios de turno observados pela da equipe de operação, registros de manutenção informados durante e após a montagem do equipamento e o históricos do equipamento levantados pela equipe de manutenção preditiva e montada a Análise da Árvore de Eventos (ETA) do Inglês, *Event Tree Analysis*.

Fonte: Apostila do curso de Engenharia da Confiabilidade, módulo: Métodos Análise de Falhas.

Esta análise consistiu em levantar todas as ocorrências e dados disponíveis e fazer um procedimento indutivo, que mostra todos os resultados possíveis advindos de um evento iniciador, acidental, e avalia quais impactos podem decorrer deste evento. E uma vez construída a árvore de eventos, calcular as probabilidades associadas a cada ramo do sistema que conduz a algum sucesso.

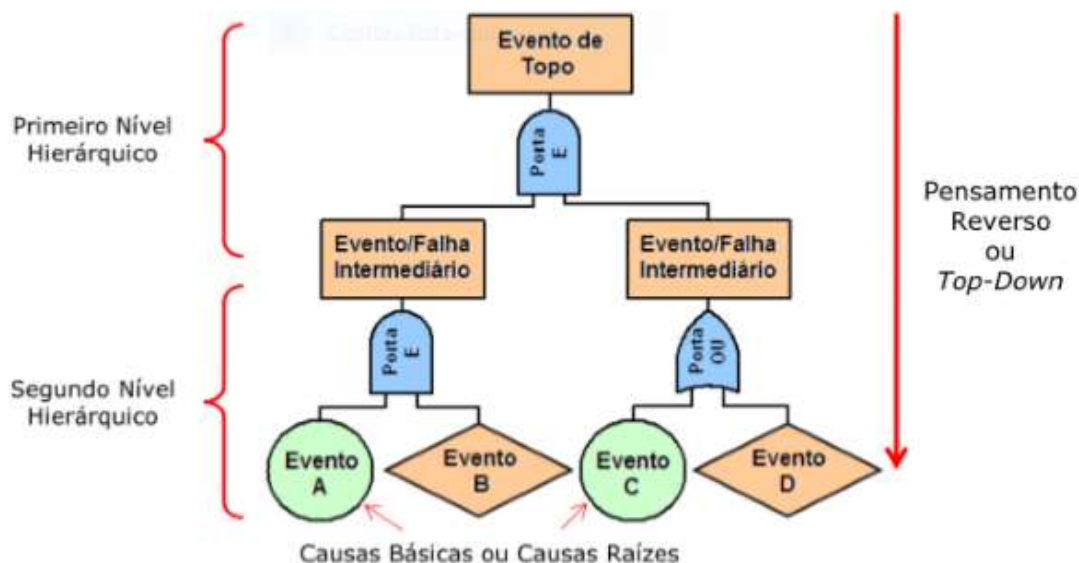
3.3 ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS

Com os dados levantados na ETA, e com o objetivo de estudar o modo e se possível o mecanismo de falha, definir a causa básica e sugerir ações que evitem a reincidência desta anomalia, ou que diminuam as consequências da falha, o mesmo GT fez a Análise de Falhas - FTA (do inglês *Fault Tree Analysis*) que é um método semelhante ao anterior, mas, que difere por ser um procedimento dedutivo, que busca identificar, a partir de uma ocorrência indesejável (falha), denominada Evento Topo, suas possíveis causas, identificando a probabilidade de ocorrência e os conjuntos mínimos de fatores que contribuem para seu aparecimento.

Fonte: Apostila do curso de Engenharia da Confiabilidade, módulo: Métodos Análise de Falhas.

Como mostra a Figura 3.1 a estimativas de probabilidade é aplicada a cada evento na árvore e estas são combinadas logicamente usando portas lógicas "and" (e) e "or" (ou) para definir a probabilidade do evento topo.

Figura 3.1 – Modelo de Uma Árvore de Falha



Fonte: Rigoni (2014, adaptado)

A confiabilidade de um sistema é profundamente afetada não só pela confiabilidade de seus componentes, mas também pelo arranjo físico e as proteções disponíveis para seu correto funcionamento, principalmente por causas aleatórias (surto de tensão, bloqueios, operação incorreta, etc).

3.4 ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA PELA ANÁLISE DE WEIBULL

A distribuição de *Weibull* é geralmente usada para representar os modos de falha de sistemas eminentemente mecânicos caracterizados por taxas de falha crescentes. (NIKOLAIDIS, GHIOCEL, SINGHAL, 2005).

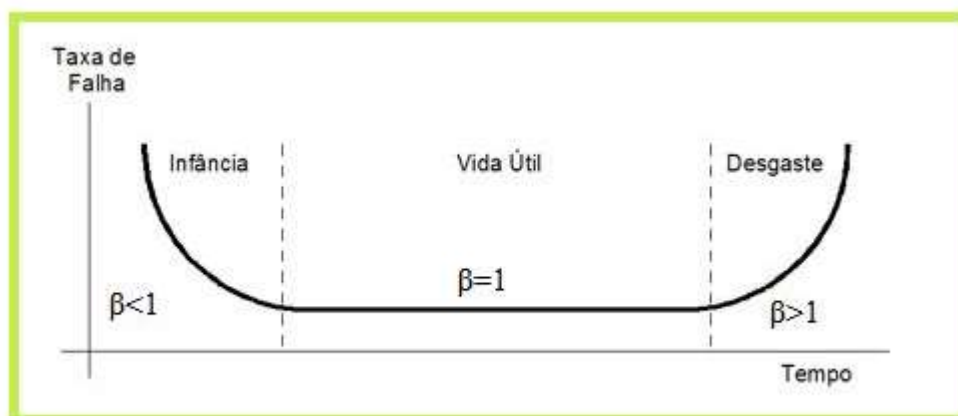
O engenheiro e matemático sueco Ernst Hjalmar Waloddi Weibull fez uma contribuição substancial para confiabilidade de sistemas mecânicos por meio do desenvolvimento da estatística. Foi o primeiro a modelar uma falha física em um modelo matemático. O modelo de *Weibull* contém o conceito de

fratura frágil que afirma que qualquer falha ou defeito de tamanho crítico faz toda a estrutura falhar e que pode ser derivada dos dados estatísticos de falhas do ponto mais fraco dentro de um sistema. (NIKOLAIDIS, GHIOCEL, SINGHAL, 2005).

A distribuição *Weibull* é extensivamente usada em análise de confiabilidade e de dados de vida devido a sua versatilidade. Dependendo dos valores dos parâmetros, a distribuição *Weibull* pode ser usada para modelar uma variedade de comportamentos que envolva vida. Um aspecto importante da distribuição *Weibull* é como os valores do parâmetro de forma (β) e de vida característica (η) afetam a características da distribuição, como a forma da curva da pdf, da confiabilidade e da taxa de falhas. (*RELIABILITY HOT WIRE*, 2005). Nos estudos de engenharia de confiabilidade, o parâmetro de posição (γ) caracteriza a vida inicial do item sendo, na maioria das aplicações, desprezado, $\gamma=0$. (SIMONETTI, SOUZA, SILVEIRA, ARRUDA, 2014).

Conforme mostra a Figura 3.2, as distribuições *Weibull* com o $\beta < 1$ têm uma taxa de falha que diminui com tempo, conhecida também como falha infantil ou prematura, as distribuições de *Weibull* com o β próximo de ou igual a 1 têm uma taxa de falha razoavelmente constante, indicando a vida útil ou de falhas aleatórias e as distribuições de *Weibull* com o $\beta > 1$ têm uma taxa de falhas que aumenta com o tempo, conhecido também como falhas de desgaste. Estes betas abrangem as três fases da "clássica curva da banheira".

Figura 3.2 – Ilustração da Curva da Banheira



A distribuição *Weibull* mista com uma subpopulação com o $\beta < 1$, uma subpopulação com o $\beta = 1$ e outra com o $\beta > 1$, teria um gráfico de taxa de falhas que fosse idêntico à curva da banheira. (*RELIABILITY HOT WIRE*, 2005).

3.4.1 Distribuição *Weibull* 3 Parâmetros

A função densidade de probabilidade (pdf) do inglês *Probability Density Function* de *Weibull* de 3 parâmetros é dado por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.1$$

Onde:

$$f(t) \geq 0, t \geq \gamma$$

$$\beta > 0$$

$$\eta > 0$$

$$-\infty < \gamma < +\infty$$

3.2

e:

η = parâmetro de escala ou vida característica

β = parâmetro de forma (ou inclinação)

γ = parâmetro de localização (ou vida livre de falha)

(<http://www.reliawiki.org>)

3.4.2 Distribuição *Weibull*-2 Parâmetro

O *Weibull pdf* de 2 parâmetros é obtido $\gamma = 0$ e é dado por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.3$$

(<http://www.reliawiki.org>)

3.4.3 Distribuição Weibull 1 Parâmetro

O 1-parâmetro *Weibull pdf* é obtido ajustando novamente $\gamma = 0$ e assumindo $\beta = C = \text{Constante}$.

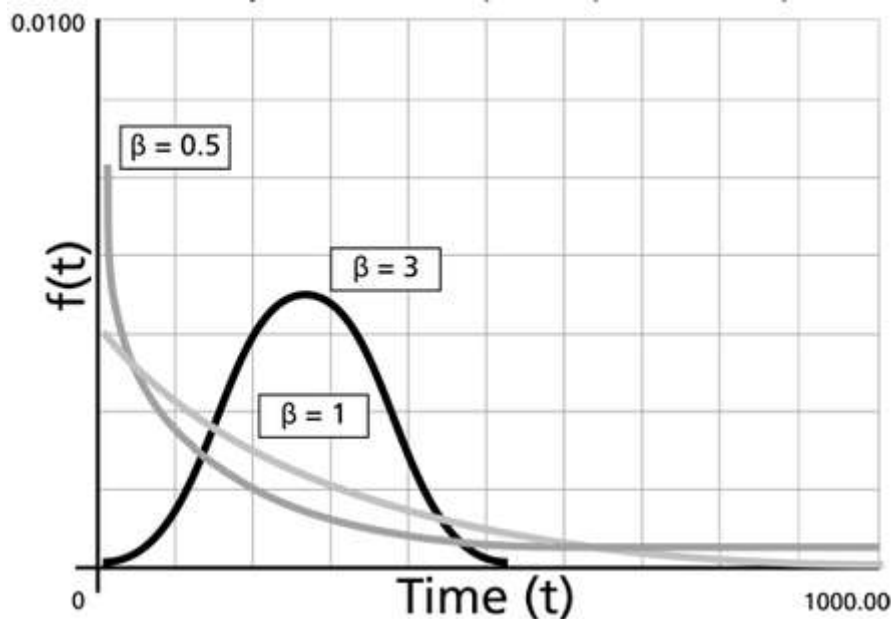
$$f(t) = \frac{C}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{C-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^C} \quad 3.4$$

onde o único parâmetro desconhecido é o parâmetro de escala, η .

Note que na formulação do *Weibull* de 1 parâmetro, assume-se que o parâmetro forma β é conhecido, a priori, de experiências anteriores com produtos idênticos ou similares. A vantagem de fazer isso é que os conjuntos de dados com poucas ou nenhuma falha podem ser analisados (<http://www.reliawiki.org>).

3.4.3.1 Efeitos do Parâmetro Beta (β) na PDF

O parâmetro β da distribuição *Weibull*, também é conhecido como o declive. Isso porque seu valor define a inclinação da linha regressada em um gráfico de probabilidade. Valores diferentes deste parâmetro podem ter efeitos marcados no comportamento da distribuição. De fato, alguns valores farão com que as equações de distribuição sejam reduzidas às de outras distribuições.

Gráfico 3.1 – Weibull pdf com $\beta < 0$, $\beta > 0$ e $\beta = 0$ 

Fonte <http://www.reliawiki.org>

O parâmetro β é um número puro (isto é, é adimensional). O gráfico 3.1 mostra o efeito de diferentes valores do parâmetro, na função da *pdf*. Verifica-se que a função assume várias formas com base no valor de β (<http://www.reliawiki.org>).

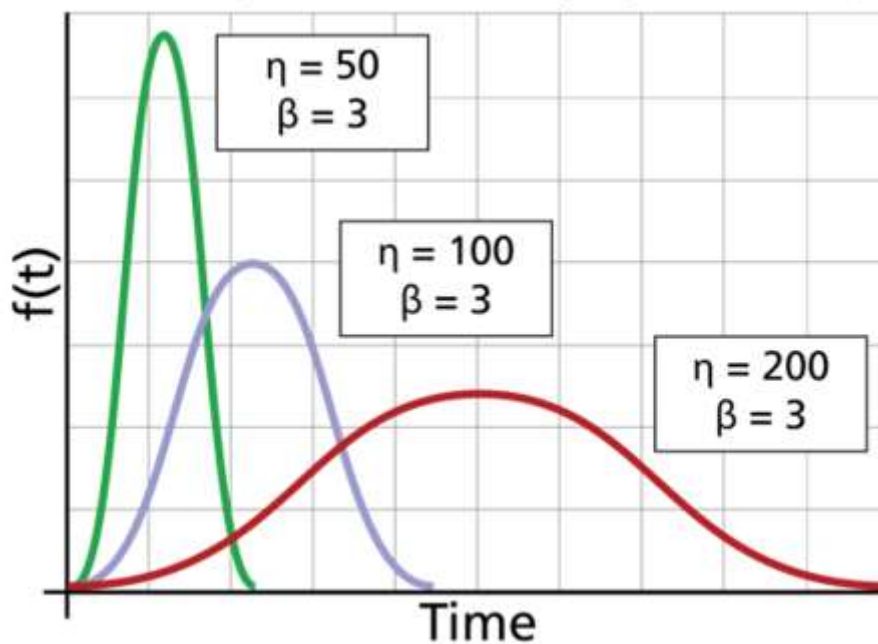
3.4.3.2 Efeitos do Parâmetro Eta (η) na *PDF*

Uma mudança no parâmetro η tem o mesmo efeito na distribuição que uma mudança da escala de abscissas. Aumentando o valor de η enquanto aguarda β constante tem o efeito de esticar o pdf. Como a área sob uma curva pdf é um valor constante de um, o "pico" da curva pdf também diminuirá com o aumento de η , como indicado no Gráfico 3.2.

E se η aumenta enquanto β e γ são mantidos da mesma forma, a distribuição é esticada para a direita e sua altura diminui, mantendo sua forma e localização.

E se η diminui enquanto β e γ são mantidas iguais, a distribuição é empurrada para a esquerda (ou seja, para o seu início ou para 0 ou γ), e sua altura aumenta.

Gráfico 3.2 – Weibull pdf com η variando para $\beta > 0$



Fonte: <http://www.reliawiki.org>

Verifica-se que η tem as mesmas unidades que t , como horas, milhas, ciclos, atuações, etc. (<http://www.reliawiki.org>).

3.4.3.3 Efeitos do Parâmetro Gama (γ) na PDF

O parâmetro de localização γ , como o nome indica, localiza a distribuição ao longo da abscissa. Alterar o valor de γ tem o efeito de deslizar a distribuição e sua função associada para a direita (se $\gamma > 0$) ou para a esquerda (se $\gamma < 0$) (<http://www.reliawiki.org>).

3.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS

Após obtidos os valores dos parâmetros para o equipamento em estudo, estes serão comparados com os dados do projeto *OREDA*.

O projeto *Offshore and Onshore Reliability Data* foi iniciado em 1981 com a colaboração da *Norwegian Petroleum Directorate* que teve, posteriormente, seu nome alterado para *Petroleum Safety Authority Norway* (*OREDA, 2015*). O objetivo principal do *OREDA* é contribuir para a melhoria na concepção e na operação de sistemas e facilidades no setor de óleo e gás seguras, rentáveis e eficientes. Isso é subsidiado por um banco de dados de confiabilidade para análises de projetos, operacionais e de manutenção, além de permitir a troca de informação desses dados entre as companhias participantes do projeto (*OREDA, 2015*).

3.6 SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo é definido os métodos e ferramentas utilizadas no estudo de caso relacionado da falha da bomba de amônia ocorrida no processo industrial.

Após a aquisição dos dados de confiabilidade observados e levantados a partir da distribuição *Weibull*, a comparação destes com os dados do *OREDA*, irá expressar a origem da perda de função, seja ela, falta de redundância, mudança de projeto, mudança no modo de operação, mudança no plano de manutenção preditiva, preventiva ou detectiva, etc e isto irá definir o plano de ação a ser tomado.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS EVENTOS

Neste capítulo são apresentados os eventos observados, os dados obtidos, a interpretação, as possíveis causas que levaram à ocorrência destes e o plano de ação sugerido pela equipe do GT, com algumas ações já implantadas e o prazo para outras ações que necessitam de parada de produção.

4.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de se chegar à análise das causas de perda de função do sistema que, mesmo apresentando redundância, devido às falhas simultâneas das bombas de amônia 19-1101-01 e 19-1101-06, levaram a interrupções do processo de partida de produção e/ou à parada da produção da planta.

O GT, montado por uma equipe multidisciplinar, analisou alguns cenários registrados e uma árvore de eventos foi elaborada.

4.2 DESCRIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS.

1º EVENTO

Em 31/03/2017, no início da madrugada, foi detectado pela operação, alarme de fuga para terra no Centro de Carga, painel PN-52215. No mesmo dia, com apoio da MI/EI, ao final da tarde, foi identificado pela operação que o problema era na motobomba 19-1101-01. Esta foi desligada, e partido a motobomba 19-1101-06, atendendo ao processo.

2º EVENTO

Em 20/04/2017 às 09:20 horas: a motobomba de amônia 19-1101-06 entrou em falha, houve atuação da proteção elétrica decorrente de curto-

circuito no bobinado do motor. A bomba 19-1101-01 estava indisponível, fato que desencadeou a parada das unidades de amônia e uréia.

4.2.1 Descrição Das Ocorrências

Em 31/03/2017 a MI/EI fez medição elétrica da 19-1101-01, através do painel de acionamento e constatou baixa isolação. Havia vazamento de amônia no bloqueio de descarga da motobomba. Não houve condições de intervenção no equipamento. Na ocasião a MI estava deficitária de recursos (contratos de manutenção de EE e ED em fase de mobilização e EI em fase final de licitação), para viabilizar a remoção do equipamento com segurança, tendo em vista o problema de vazamento de amônia.

Em 20/04/2017 com a parada da fábrica, ambas as bombas foram removidas para a oficina. Constatado falha de isolamento nos bobinados por contaminação por amônia mais água. Verificado através de ensaio de líquido penetrante que os tubos de encapsulamento dos estatores de ambas as bombas estavam com trincas nas soldas. Ambos os estatores foram enviados pela MI/EI para recuperação em regime de emergência para a única empresa especializada que já tinha consertado este tipo de motor para a empresa, desde sua entrada em operação. A MI/ED providenciou fabricação externa de tubos e discos de vedação em inox para reposição do encapsulamento, segundo o desenho feito em 1988.

3º EVENTO

Em 26/04/2017 a MI/ED, após concluir montagem mecânica, instalou a moto-bomba 19-1101-06 na área. Porém, durante o alinhamento para o processo ocorreu vazamento de amônia pela carcaça. Houve necessidade de nova remoção para identificar o problema.

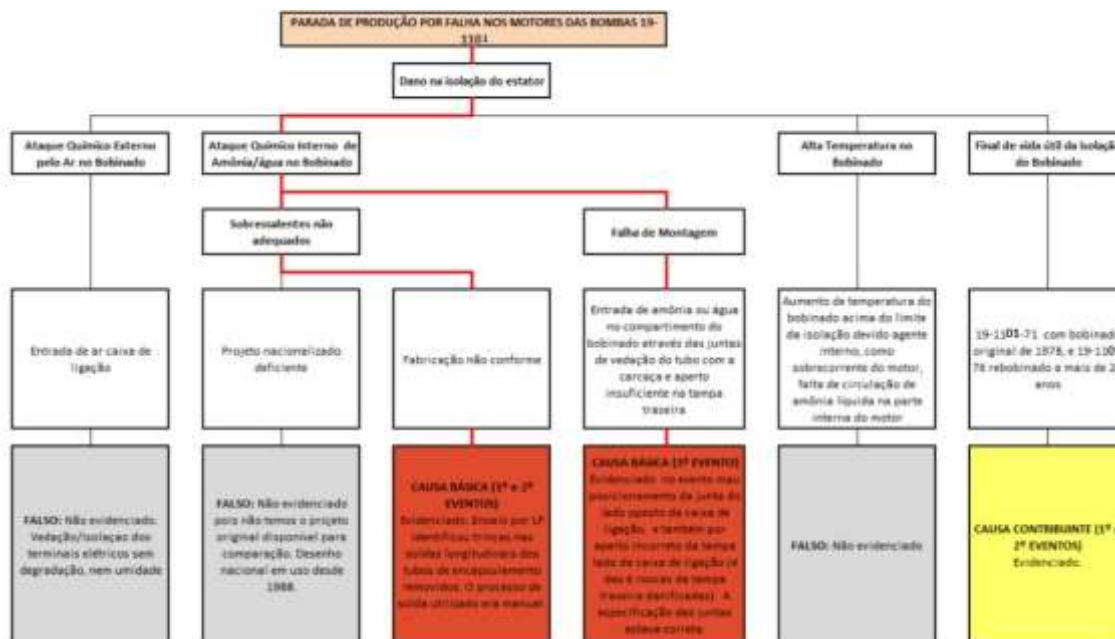
A MI/ED constatou problema de montagem incorreta de uma das juntas, e corrigiu o problema.

Na madrugada de 27/04/2017 a MI/ED, entregou a 19-1101-06, para testes pela operação e medição de vibração. Não detectados problemas, o equipamento foi liberado para operação.

4.3 ÁRVORE DE EVENTOS

Com base nos dados levantados, foi montada a árvore de eventos conforme mostra a figura 4.1.

Figura 4.1 – Árvore de eventos elaborada a partir dos levantamentos obtidos



Fonte: Autor 2018

É constatado que várias combinações de eventos levaram perda de função do sistema e, em decorrência, a parada de produção da planta.

4.4 ANÁLISE DAS FALHAS

Em consulta ao SAP de histórico de manutenção, aos documentos de engenharia (desenhos), entrevista com os executantes da manutenção e operação e inspeção de campo o GT partiu a nova fase de evidenciar as causas das falhas.

4.4.1 Evidências do Primeiro e Segundo Eventos

A figura 4.2 mostra as avarias que estava submetido o tubo de encapsulamento tirado do bobinado do motor as 19-1101-06.

Figura 4.2 – Tubo de Encapsulamento – 19-1101-06



Fonte: foto RTA elaborada em 2017/0018

Na figura 4.2 é possível verificar as condições em que estava o tubo de encapsulamento, tal situação fazia com que este dispositivo não executasse a função a que foi proposto.

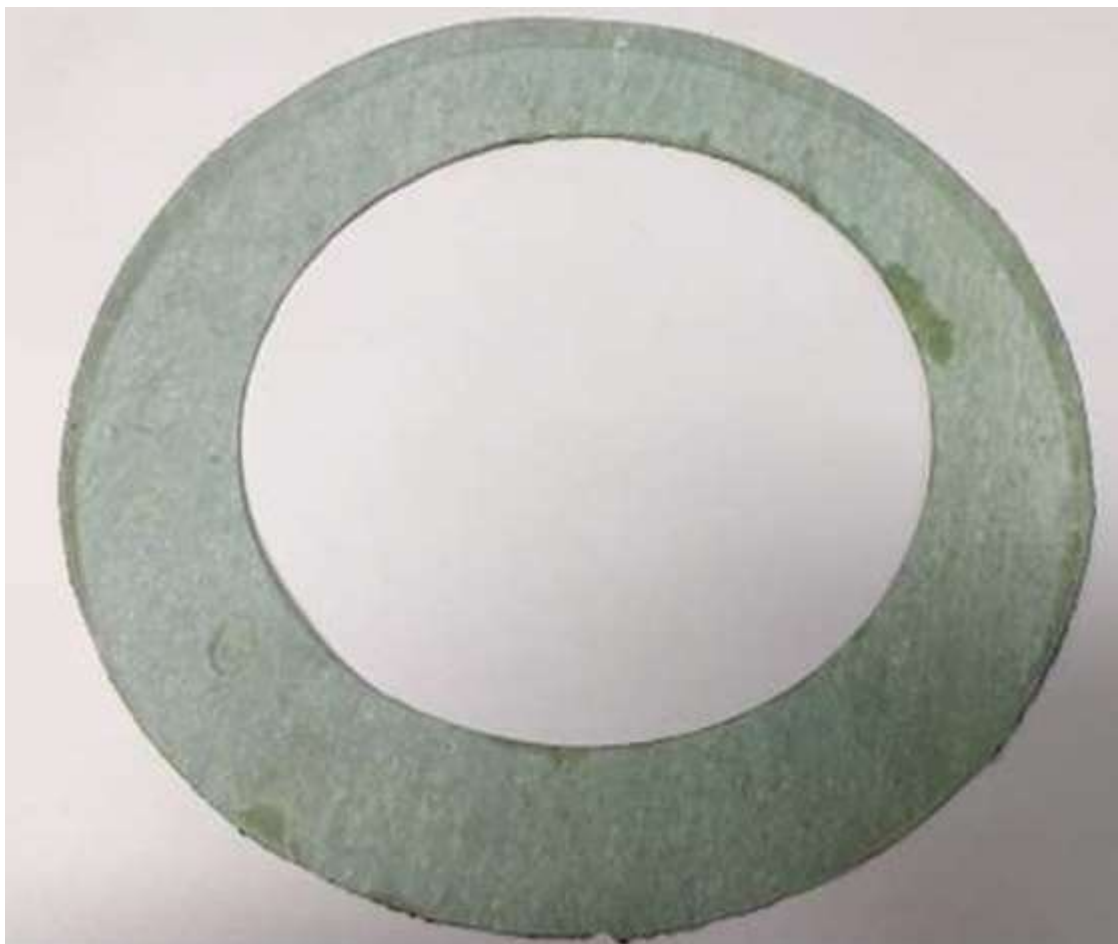
Constatado os carretéis de encapsulamento dos estatores dos motores fora de especificação quanto ao tipo de solda e dimensão longitudinal e degradação dos bobinados por final de vida útil.

4.4.2 Evidências do Terceiro Evento

Neste cenário é verificado que após a entrega do equipamento para a operação, este apresenta falha já no alinhamento do produto (amônia) antes mesmo de ser colocado em operação, isto sugere de imediato que houve falha

na montagem o que é constatado posteriormente na oficina conforme pode-se ver na figura 4.3.

Figura 4.3 – Junta do Lado Oposto a Caixa de Ligação



Fonte: Elaboração GT

Na figura 4.3 fica evidente que a junta, em papelão hidráulico, foi feita fora de medida onde a equipe técnica do GT analisou também as marcas nesta e comparou com os flanges da bomba e constatou evidências montagem incorreta do dispositivo.

4.5 CONSTATAÇÕES DESTES TRÊS EVENTOS

Com estes dados o GT obteve as seguintes conclusões:

- Carretéis de encapsulamento dos estatores dos motores fora de especificação quanto ao tipo de solda e dimensão longitudinal;

- Degradação dos bobinados por final de vida útil. O bobinado da 19-1101-01 estava com 38 anos, e o da 19-1101-06 com cerca de 25 anos
- Montagem incorreta das motobombas, e uso de componentes danificados/não conformes;
- Falta de documentação técnica detalhada das motobombas;
- Falta de peças originais de reposição;
- Não execução do plano de manutenção preditiva de elétrica no ano de 2016. Falta de procedimento da MI/ED de desmontagem e montagem das motobombas.

4.5.1 Causa Contribuinte

Além das causas que foram determinantes para a ocorrência da falha, também foi observada a causa contribuinte.

- Degradação dos bobinados por final de vida útil. O bobinado da 19-1101-71 era original de 1978 (estava com 38 anos), e o da 19-1101-76 foi rebobinado a mais de 20 anos.

4.6 AÇÕES CORRETIVAS REALIZADAS

De imediato, para o retorno do sistema em operação e restabelecimento da função, as ações corretivas imediatas foram tomadas:

- Rebobinamento do estator;
- Pré-fabricação dos “carretéis” do encapsulamento com precisão dimensional e soldadas a laser;
- Solda de fechamento do anel do carretel com equipamento adequado e profissional qualificado;
- Inspeção de líquido penetrante nas soldas;
- Mobilização de equipe técnica da MI/ED e contratada para análise do evento e montagem das motobombas.

4.6.1 Ações de Melhorias

Também, visando o aumento da confiabilidade, foram criadas ações de melhoria visando que foram implantadas na sequência.

- Criar procedimento detalhado de manutenção e montagem das motobombas *Hermetic* 19-1101-71/76;
- Revisar desenho do tubo de encapsulamento, segundo dimensional aferido na montagem da 19-1101 (comprimento 463mm) e informando tipo de solda a ser aplicado;
- Buscar no mercado fornecedor qualificado a custo/prazo exequível, para fornecimento de encapsulamento sem costura e fazer aquisição do material;
- Fazer estudo de substituição das motobombas *hermetic*, para adequação destas motobombas, aos requisitos técnicos obrigatórios segundo a legislação vigente para instalações em atmosferas explosivas no Brasil.
- Treinar os colaboradores da operação, para situações de fuga para terra, conforme o procedimento operacional PE-4RA-0202-B Rotinas, Itens Críticos e Correções Operacionais do Sistema Elétrico;
- Corrigir concentricidade das guias do corpo do motor de modo a garantir folga de entreferro adequada.

4.7 QUARTO EVENTO OBSERVADO

Contudo, após as intervenções, um quarto evento foi observado.

No dia 09/07/2017 a unidade de refrigeração U-19 estava em processo de partida com o compressor 19-1001 (*Borsig*) em operação, quando, às 10:55 h ocorreu o *trip* do mesmo, por atuação das chaves de nível muito alto do vaso 19-2003. Houve tentativas de partidas sem sucesso das bombas 19-1101-01 e 06, posteriormente foi constatada a atuação da proteção elétrica na gaveta sem possibilidade de normalização. Acionada equipe de manutenção elétrica a qual constatou baixa isolação em ambos motores. Removidos ambos os conjuntos motobombas para inspeção e reparos.

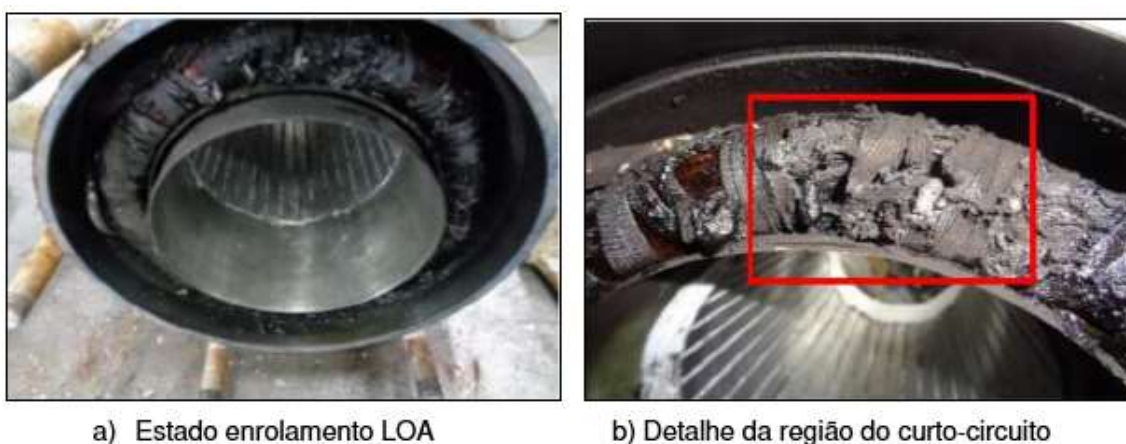
Após verificação dos instrumentos de medição de nível ficou constada a atuação correta das chaves de nível, em razão das bombas de amônia estarem indisponíveis para operar.

Após investigação dos dados históricos ficou constatado que as bombas haviam entrado em falha no dia 02/07/2017, em razão da atuação de nível alto, conforme lista de eventos e gráficos históricos.

Pelos registros fica evidenciada a partida simultânea das bombas as 10:36 h (pelo horário do *PI*) e parada da 19-1101-01 às 12:03 h e da 19-1101-06 as 12:52 h, provocada pela atuação da proteção elétrica.

Na inspeção dos internos das bombas não foram identificados danos, apenas nos mancais axiais e radiais do lado LOA do motor 19-1101-06 apresentavam sinais de deformação por sobreaquecimento. A figura 4.4 ilustra o descrito.

Figura 4.4 – Detalhes dos Danos Nos Mancais LOA



Fonte: foto RTA elaborada em 2017/0018

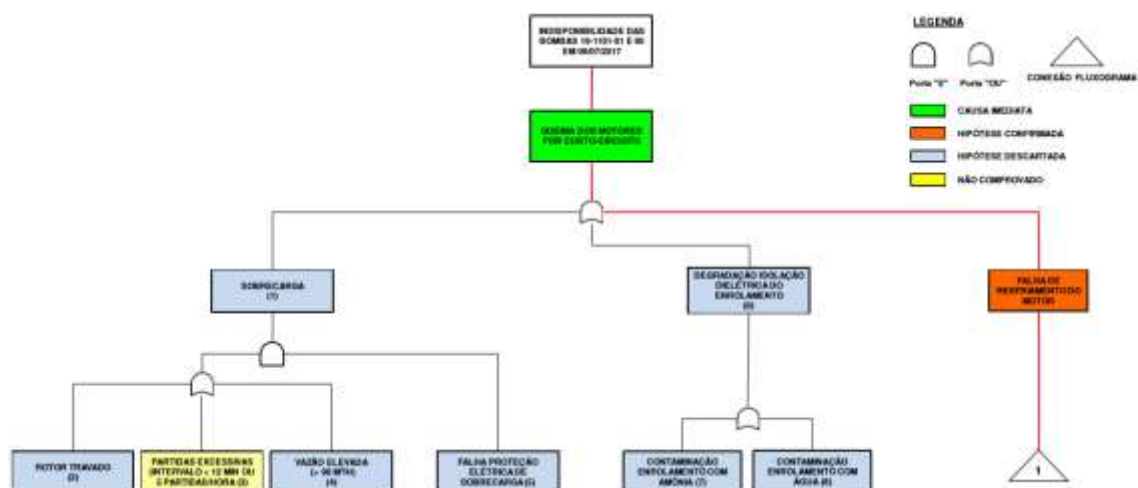
Nos motores, os enrolamentos apresentavam sinais de sobreaquecimento mais intenso nos lados LOA, especialmente no 19-1101-06, região onde ocorreu o curto-circuito.

4.8 ÁRVORE DE FALHAS

Para análise das causas da falha das bombas foi utilizada a metodologia da árvore de falhas, apresentada nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7 com todas as

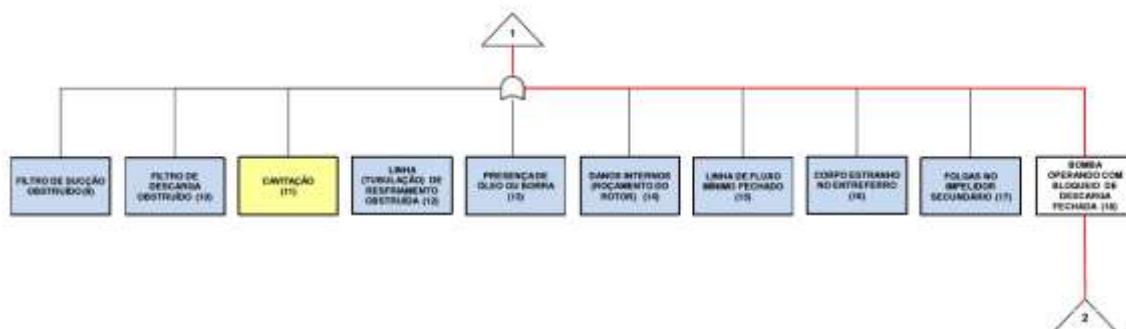
hipóteses confirmadas ou descartadas após comprovação com dados históricos disponíveis dos sistemas supervisório e de eventos do sistema de intertravamento, entrevistas com os envolvidos e das inspeções nos equipamentos avariados.

Figura 4.5 – 1ª Parte da Árvore de Falhas



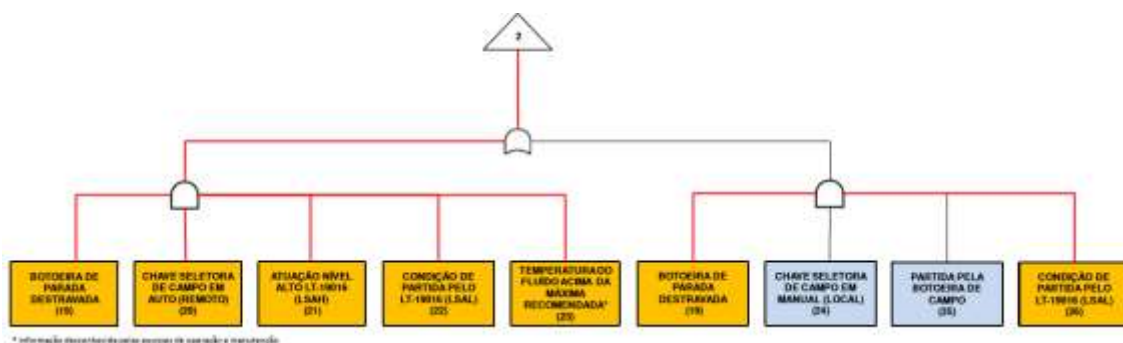
Fonte: autor -2018

Figura 4.6 – 2ª Parte da Árvore de Falhas (continuação)



Fonte: Autor - 2018

Figura 4.7 – 3ª Parte da Árvore de Falhas (continuação)



Fonte: Autor - 2018

A árvore de falhas evidencia as possíveis causas do problema que levaram a perda de função do sistema e, por consequência, parada de produção.

Com estas evidências foi montado o quadro 4.1 para melhor destaque e visualização das causas.

Quadro 4.1 – Evidências Levantadas na Análise por Árvore de Falhas

| CAUSAS | Nº | PROBABILIDADE | COMPROVAÇÃO |
|------------------------------|----|---------------|--|
| Sobrecarga na bomba | 1 | Nula | Sem evidências de danos nos mancais das bombas |
| Rotor travado | 2 | Nula | Sem evidências de danos no conjunto rotativo e em mancais das bombas |
| Número excessivo de partidas | 3 | Baixa | Embora exista a possibilidade de partidas automáticas quando o nível do vaso estiver operando próximo ao nível da LSAL19016, não existe indícios de que houveram partidas excessivas nos equipamentos para esse evento. |
| Vazão elevada | 4 | Nula | Sem evidência de operação em vazão maior que a vazão máxima (QMAX) de 90 m ³ /h informada pelo fabricante da bomba e também por haver proteção habilitada de sobrecarga por corrente. Outro limitante é a capacidade da LV-19011 cuja vazão máxima é de 84 m ³ /h. |
| Falha da proteção elétrica | 5 | Nula | A proteção existente é para curto-circuito e sobrecarga, realizada por disjuntor motor e embora não tenha |

| | | | |
|--|----|------------|--|
| | | | sido calibrada no último ano está funcional. |
| Degradação isolação moto | 6 | Nula | Sem evidências de degradação da isolação dos enrolamentos do motor causada por contaminantes. |
| Contaminação enrolamento com amônia | 7 | Nula | Sem evidência de contaminação por amônia durante a abertura do motor |
| Contaminação enrolamento com água | 8 | Nula | Sem evidência de presença de água no estator |
| Filtro de sucção obstruído | 9 | Nula | Sem evidência de sujeiras e borras quando da inspeção dos filtros. |
| Filtro de descarga obstruído | 10 | Nula | Sem evidência de sujeira ou borra nos filtros de descarga |
| Cavitação | 11 | Baixa | Não foi possível descartar esta hipótese por não dispormos de monitoramento (dados históricos) de corrente elétrica e pressão na descarga da bomba e por não haver danos aos internos da bomba. Neste caso, se houve cavitação foi de baixa intensidade e por curto período de tempo |
| Linha (tubulação) de resfriamento obstruída | 12 | Nula | Sem evidência segundo a equipe de manutenção. |
| Presença de óleo ou borra na bomba | 13 | Nula | Sem evidência de quantidade significativa de óleo ou borra. |
| Danos internos (roçamento do rotor) | 14 | Nula | Sem evidência conforme relatório de inspeção |
| Linha de fluxo mínimo fechado | 15 | Baixa | Não foi possível avaliar o desempenho da válvula de fluxo mínimo, apesar de a linha ficar sempre alinhado para retorno ao vaso. |
| Corpo estranho no entreferro | 16 | Nula | Sem evidência de danos ao rotor e ao tubo do estator |
| Folgas no impelidor secundário | 17 | Nula | Sem evidência de folgas no impelidor menor |
| Bomba operando com bloqueio de descarga | 18 | Confirmada | No dia 02/07/2017 as válvulas de bloqueio de descarga de ambas as bombas estavam fechadas conforme procedimento, porém as bombas |

| | | | |
|---|----|------------|---|
| fechada | | | entraram operação. Evidenciado também pela ausência de vazão de saída (FI-19051). |
| Botoeira de parada destravada | 19 | Confirmada | Confirmado pelo comando de partida da bomba por nível alto pelo LSAH-19016 |
| Chave seletora de campo em auto (remoto) | 20 | Confirmada | Confirmado pelo comando de partida da bomba por nível alto pelo LSAH-19016 |
| Atuação nível alto LT19016 (LSAH) | 21 | Confirmada | Atuação confirmada na lista de eventos do supervisório e trend do LI-19016, embora a indicação fosse diferente do LI-19011 |
| Condição de partida pelo LT-19016 (LSAL) | 22 | Confirmada | Sem registro de atuação de nível baixo |
| Temperatura do fluido acima da máxima recomendada pelo fabricante | 23 | Confirmada | Devido ao compressor estar parado a pressão do vaso 19-2003 fica equalizada com o vaso 19-2001 em torno de 7 bar (PI19184) e conseqüentemente a temperatura da amônia fica em torno de 15 °C. |
| Chave seletora de campo em "Manual" ("Local") | 24 | Nula | Sem evidência, porque as bombas partiram simultaneamente pela atuação da chave de nível alto. |
| Partida manual pela botoeira de campo | 25 | Nula | Sem evidência, porque as bombas partiram simultaneamente pela atuação da chave de nível alto. |
| Condição de partida pelo LT-19016 (LSAL) | 26 | Confirmada | Sem registro de atuação de nível baixo |

Fonte: Elaboração GT

4.9 CONCLUSÃO

Pela análise da árvore de falhas apresentadas nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7 e posteriormente analisando o quadro 4.1 ficaram estabelecidas como causas básicas a falha no procedimento de bloqueio, impedindo partida indevida das bombas, falha de reconhecimento e tratamento de sinalização e alarmes de nível alto e falha do transmissor de nível LT-19016, quando a unidade estiver parada. Como causa contribuinte, havia o desconhecimento das equipes de

operação, engenharia e manutenção quanto à temperatura máxima permitida para o fluido no interior da bomba.

4.10 ANÁLISE WEIBULL

Devido às falhas recorrentes deste sistema, mesmo após a intervenção corretiva, o treinamento da equipe de manutenção, a alteração de projeto e demais recomendações do GT, ainda algo precisava ser verificado. O fato do fenômeno ainda estar presente e causando prejuízos significativos à empresa e risco de segurança de processo, nova ferramenta foi utilizada no intuito de parametrizar as falhas e desta forma ter um comparativo quantitativo das ocorrências.

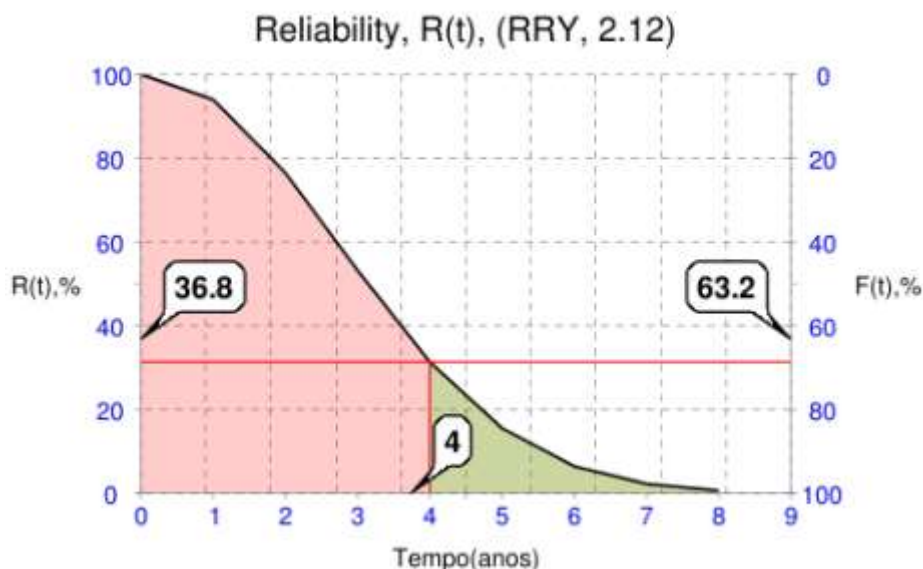
Bombas centrífugas são equipamentos tecnológicos compostos por subsistemas, cujos modos de falha competem entre si pela falha geral: o primeiro componente ou subsistema que falhar causa a falha sistêmica. Esta estrutura de falha remete à distribuição de *Weibull*

Com os dados disponíveis, foi utilizado o programa disponível na página https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/weibull_analysis, onde tal ferramenta executa uma análise de dados realizando o ajuste deles a uma distribuição Weibull bi-paramétrica. Para determinar o parâmetro de forma *Weibull* (β) e a vida característica (η).

$$R(t) = e - \left(\frac{t-\delta}{\eta} \right)^\beta \quad 4.1$$

Após o lançamento dos dados e, clicando no comando de “calcular” se obteve a seguinte curva de confiabilidade conforme mostra o gráfico 4.1 que é definida pela equação 4.1.

Gráfico 4.1 – Curva de Confiabilidade



Fonte: adaptada página *reliabilitytoolkit*

Observação: Dados obtidos da análise Weibull realizada no app *Reliability Toolkit Analytics*

Como o tamanho da amostra é menor que 15 (itens com falha e suspensões), as estimativas de parâmetros baseadas em regressão linear são consideradas mais precisas. Contudo, algumas informações significativas são verificadas.

Conforme o quadro 4.2 pode-se verificar os seguintes parâmetros.

Quadro 4.2 – Parâmetros Obtidos pela Distribuição *Weibull*

| PARÂMETROS | Limite de confiança inferior a 95,0% | Ponto estimado | Limite de confiança superior a 95,0% |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|
| Parâmetro de forma (β) | 1 | 3 | 7 |
| Vida característica (η) | 3 | 5 | 7 |

Fonte: adaptado página *reliabilitytoolkit*

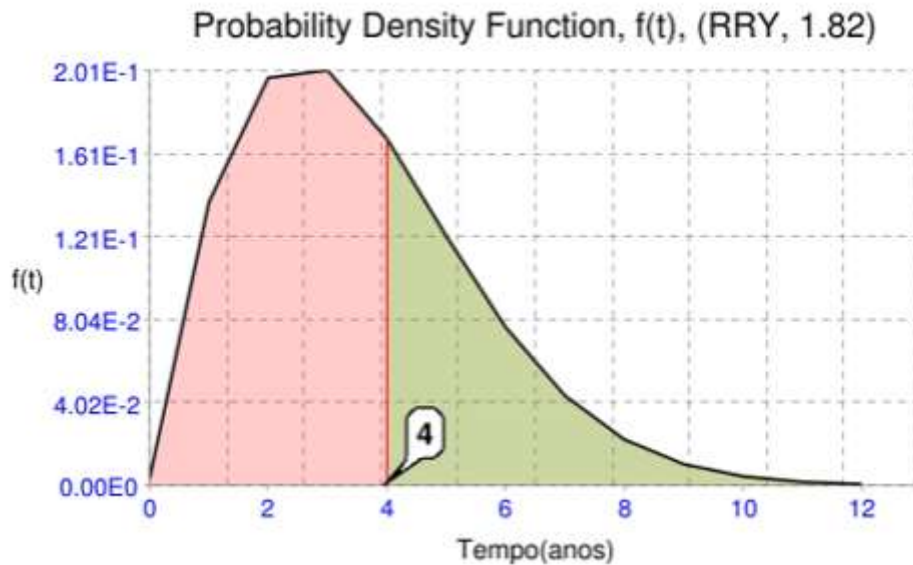
Observação: Dados obtidos da análise Weibull realizada no app *Reliability Toolkit Analytics*

Todos os pontos são baseados em parâmetros derivados de regressão linear, regressão de postos no método y (RRY). Este método é comumente usado para tamanhos de amostra de 15 ou menos.

E através da equação 4.3 o programa plota a curva de densidade de probabilidade conforme mostra a gráfico 4.2.

$$f(t) = \frac{\beta(t-\delta)^{\beta-1}}{\eta^\beta} e - \left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta \quad 4.3$$

Gráfico 4.2 – Curva Densidade de Probabilidade



Fonte: adaptada página *reliabilitytoolkit*

Observação: Dados obtidos da análise Weibull realizada no app *Reliability Toolkit Analytics*

O valor de β tem um efeito marcante na taxa de falha da distribuição de *Weibull* e inferências podem ser tiradas sobre as características de falha de uma população apenas considerando se o valor de β é menor que, igual a ou maior que um.

Como foi possível constatar o parâmetro $\beta > 1$ implica que a curva é convexa, com sua inclinação aumentando. Consequentemente, a taxa de falhas aumenta a uma taxa crescente, indicando falha por desgaste. Isto implica que para um aumento da disponibilidade e consequente confiabilidade do sistema se faz necessário mudança no projeto ou aumento da redundância. Uma vez que não há evidência de mortalidade infantil ou falhas aleatórias. Contudo, é recomendável uma comparação com outros sistemas semelhantes que eventualmente irá sugerir mudança no padrão de manutenção e/ou operação.

4.11 COMPARAÇÃO DOS DADOS

Os resultados obtidos foram parametrizados através da ferramenta da ferramenta de análise *Weibull* e comparados com os registros do *Oreda*.

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

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

Os dados de taxa de falha do equipamento foram comparados com os dados de taxa de falhas do *Oreda* e tomadas as informações qualitativas associadas com os resultados de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, torna-se, possível, portanto, ao gestor do ativo realizar um planejamento estratégico, implementando um plano de manutenção baseado em confiabilidade a partir dessa metodologia.

4.12 CONCLUSÃO DO GT

Como novos eventos foram observados a partir das recomendações de melhorias e manutenções corretivas aplicadas a partir dos primeiros três eventos. Ficou comprovado que as ações implementadas não foram suficientes para aumentar confiabilidade e disponibilidade do sistema. Logo, uma análise referente às sugestões anteriores deveria ser feita.

4.13 NOVAS AÇÕES DE MELHORIA

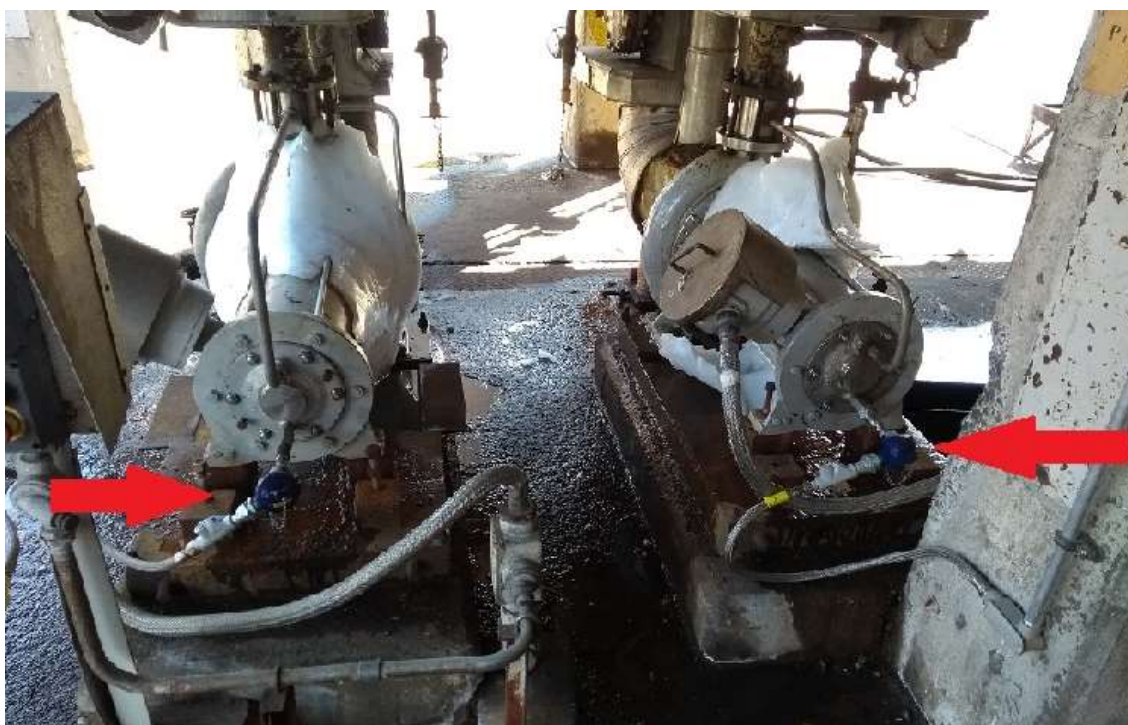
Com base nas causas levantadas pelo grupo nas reuniões de análise foram recomendadas ações a fim de eliminar a ocorrência de queima do motor e dos mancais por falha de resfriamento.

4.13.1 Ações Principais

De imediato as ações corretivas foram implantadas:

- Revisar o procedimento operacional e treinamentos das equipes com objetivo de evitar partidas indevidas, sobretudo quando o compressor estiver parado;
- Implementar monitoramento (TI) da temperatura do fluido de resfriamento dos mancais LOA do motor, e alarme conforme recomendação do fabricante (maior que $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), conforme mostra figura 4.8.

Figura 4.8 – Bombas Com os Sensores de Temperaturas Instalados



Fonte: Autor – 2018

4.13.2 Demais Recomendações

E recomendações, feitas pelo GT, foram implantadas posteriormente:

- Implementar monitoramento (*PI*) e intertravamento de desligamento das bombas por temperatura alta do enrolamento (estator) do motor, através de sonda (termistor);
- Elaborar procedimento de manutenção para desmontagem e montagem das bombas e dos motores, considerando as recomendações do fabricante;
- Implementar monitoramento (*PI*) da corrente elétrica do motor com alarme da corrente nominal do motor;
- Implementar temporização de 4 segundos após atuação de nível baixo LSAL19016 (19-2003) e LSAL-19020 (19-2002) com objetivo de diminuir o número de partidas em função da temporização de reaceleração existente (2 segundos);
- Padronização dos ranges dos transmissores de nível LT-19011 e LT-19016, do vaso 19-2003 e dos LT-19012 e LT-19020, do vaso 19-2002, com objetivo de evitar erro de interpretação dos operadores;

4.13.3 Implementações Futuras

As orientações do GT se estenderam para outro equipamento de características semelhantes conforme mostra o quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Ações futuras e ações aplicadas às bombas 19-1101/2-01/06

| ITEM | | AÇÃO | RESPONSÁVEL | PRAZO |
|------|---|---|------------------------------|------------|
| 1 | A | Elaborar ou revisar procedimento para travar as botoeiras de parada e também da chave seletora Manual (Local)/Auto (Remoto) com objetivo de impedir partidas indevidas de todas as bombas da unidade. | TPO | CONCLUÍDO |
| | B | Revisar manual de operação das bombas 19-1101-01/06 e 19-1102-01/06 incluindo as restrições operacionais dessas bombas, sobretudo temperatura de operação, vazão mínima e máxima. | TPO | CONCLUÍDO |
| 2 | | Instalar monitoramento de temperatura juntos aos mancais axiais e radiais LOA das bombas 19-1102-01/06. | Engenheiro de instrumentação | 30/08/2018 |
| 3 | | Instalar monitoramento de temperatura e proteção do enrolamento dos motores para as bombas 19-1101-01/06 | Engenheiro de instrumentação | CONCLUÍDO |

| | | | |
|---|--|------------------------------|-----------|
| 4 | Instalar monitoramento de corrente elétrica dos motores 19-1101-71/76 e 19-1102-71/76, com objetivos de evitar condições de cavitação. | Engenheiro de instrumentação | PPG 2018 |
| 5 | Elaborar ou revisar procedimento de manutenção das bombas 19-1101-01/06 e 19-1102-01/06 com objetivo de atender as recomendações do fabricante. | Engenheiro de Manutenção ED | CONCLUÍDO |
| 6 | Inspeccionar e revisar se necessário as válvulas de fluxo mínimo das 19-1101-01/06 e 19-1102-01/06 com objetivo de assegurar, o fluxo mínimo quando do fechamento total das válvulas de descarga ou dos consumidores | Engenheiro de Manutenção ED | PPG 2018 |
| 7 | Padronizar os ranges de medição de nível e os modelos de transmissor com selo para os LT-19011 e LT-19016 do vaso 19-2003 e LT-19012 e LT-19020 do vaso 19-2002, com objetivo de | Engenheiro de instrumentação | PPG 2018 |

| | | | |
|---|--|------------------------------|-----------|
| | facilitar a tomada de decisão dos operadores e evitar erros | | |
| 8 | Implementar alarme de desvio % dos LT-19011 e LT-19016 do vaso 19-2003 e entre os LT-19012 e LT-19020 do vaso 19-2002 | Engenheiro de instrumentação | PPG 2018 |
| 9 | Implementar temporização de 4s na atuação de nível baixo LSAL-19016 (19-2003) e LSAL-19020 (19-2002), com objetivo de evitar partidas e paradas sucessivas | Engenheiro de instrumentação | CONCLUÍDO |

Fonte: elaboração GT (2017/2018)

A bomba 19-1102-01 e 19-1102-06 é uma bomba de características semelhantes do mesmo fabricante, logo, fica evidente a necessidade de tratativa idêntica visando evitar transtornos vividos com as 19-1101-01 e 19-1101-06.

Muitas ações já foram implantadas em ambas, porém, existem intervenções que requerem parada de processo, estas, serão implementadas na próxima PPG (Parada Programada Geral).

4.14 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, as ferramentas apresentadas nos capítulos 2 e 3 são executadas com o objetivo de quantizar e qualificar os eventos observados.

Os eventos são submetidos a testes na árvore de falhas com objetivo de evidenciar as causas mais aderentes a anomalia e descartar as de menor significância. Posteriormente os dados de vida foram inseridos no programa

Weibull para que um modelo do comportamento da falha fosse encontrado com base em uma distribuição Weibull de dois parâmetros isto proporcionou que as estimativas, como por exemplo a taxa de falha, pudessem ser quantizadas e comparadas com as informações sobre as falhas de bombas contidas na base do OREDA.

A implementação do sensor e transmissor de temperatura é mostrado na figura 4.6. Tal instrumento possui interface de indicação e alarme onde também é possível verificar o histórico de indicação. Esta melhoria facilita o gerenciamento auditável de eventuais danos de mesma natureza.

Visando evitar novos transtornos de mesma natureza, também é apresentado neste capítulo, no quadro 4.3, as ações sugeridas para a bomba 19-1102-01 e 19-1102-06.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados deste estudo, evidenciados o ganho que se tem ao se trabalhar com manutenção centrada na confiabilidade e também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 INTRODUÇÃO

Muitas conclusões foram encontradas a partir deste trabalho.

Se evidenciou que o processo não periódico de manutenção tende a diminuir a confiabilidade de qualquer sistema quando em campanhas mais longas. Os resultados indicaram que uma intervenção de manutenção requer planejamento adequado e que uma redução de gastos com qualidade técnica e treinamento tanto de manutenção quanto de operação resulta em falsa economia momentânea que, a curto prazo, gera prejuízos financeiros significativos à companhia e, potencialmente perigoso à vida e à saúde dos colaboradores e até da comunidade externa. Portanto, assegurar uma confiabilidade satisfatória de certos sistemas é questão de responsabilidade legal da empresa.

Estabelecer programas de manutenção preventiva baseado em análise estatísticas das falhas e não mais em sintomas do processo foi apontado como o procedimento mais adequado para a gestão dos ativos.

O fato de o sistema vir operando ao longo de mais de 30 anos sem problemas de grande relevância induziu aos técnicos e engenheiros, em um primeiro momento, a descartarem qualquer mudança no projeto ou nos procedimentos operacionais. Não levando em conta que a robustez e/ou superdimensionamento do equipamento permitiram esta longa campanha sendo operado de forma inadequada. Esta evidência só foi comprovada quando, a partir da primeira falha, os sobressalentes não tinham as mesmas características das peças originais de mais de 40 anos.

Somado a isso é observado que o sistema de manutenção e gestão possuía falhas em todos os níveis, desde o planejamento, falhas de contratos de mão de obra até a atividade fim onde o equipamento foi montado de forma errônea.

5.2 DIFICULDADES

Não há dúvidas que a gestão de manutenção baseada confiabilidade é a forma mais adequada de se otimizar a relação custo/confiabilidade. Contudo, mesmo apresentando evidências positivas dessa prática, a resistência em confiar nas estatísticas ainda é o grande obstáculo de algumas corporações. Pois é sabido que tal prática é custo aos cofres. Logo, infelizmente em muitos casos, é a partir de ocorrências de considerável relevância como a estudada neste trabalho, que as ferramentas utilizadas na confiabilidade que a princípio eram entendidas como tornar o sistema muito complexo e caro, se deram conta de que esta visão estava errada e havia a necessidade de se moldar a cultura a esta nova política.

5.3 DESCOBERTA DE UM NOVO MODO DE GESTÃO

Ainda que a resistência à mudanças seja cultural e inerente a qualquer ser ou instituição, ainda mais se tratando de uma mudança que implica em considerável logística, esta estratégia se mostrou de fundamental importância para a disponibilidade dos ativos da empresa, logo, para casos de bombas de funcionamento e características semelhantes, as mudanças do plano de manutenção e o estudo de uma possível mudança no procedimento operacional da 19-1102-01/06, por exemplo, se colocou em prática quase que simultaneamente às alterações de sua similar 19-1101-01/06 que apresentou os problemas.

5.4 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS

Com o significativo ganho obtido a partir da prática da nova metodologia de gestão de manutenção para este equipamento, fica evidente que estender este conceito aos demais equipamentos, cuja função também é relevante para o processo, se faz necessária.

Atualmente, para a maioria das empresas, as condições de disponibilidade e otimização de seu processo é questão de sobrevivência em meio a concorrência e as constantes buscas por melhorias de suas políticas de atendimento aos clientes.

Para as bombas centrífugas o estudo do modo de falha está iniciado bastando adaptar às particularidades de cada equipamento. Contudo, estudar o modo de falhas dos demais equipamentos, parametrizar tais dados e posteriormente catalogá-los de forma a manter um banco de dados, é a premissa de um projeto de aumento da confiabilidade.

Portanto, fica a sugestão de estudo destes itens citados aos equipamentos dinâmicos como bombas, compressores e turbinas que têm funcionamento mais complexo, como um princípio, e que esta política, a médio prazo, seja estendida a 100% dos equipamentos industriais da empresa.

REFERÊNCIAS

ANÁLISE DE DADOS DE CONFIABILIDADE, 2015. Disponível em: <http://reliawiki.org>

BIROLINI, Alessandro. Reliability engineering: theory and practice. New York: Springer, 2007.

Bombas – Classificação e Descrição – Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4015/capitulo3_bombasclassificacaoedescricao.pdf. Consultado em 15/08/2018

HERMETIC LIDERLE, datasheet, por *Hemetic-pumpen*, 2013

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

NIKOLAIDIS, Efstratios, GHIOCEI, Dan M., SINGHAL, Suren, *Engineering Design Reliability Handbook*. Estados Unidos da América: CRC Press LLC, 2005.

NORMAS, disponível em http://www.revistasapere.inf.br/download/engenharia_da_confiabilidade_distribuciao_weibull.pdf. Acesso em: 66 Out. 2014.

OREDA: *Offshore Reliability Data Handbook*, edição 2015.

PALLEROSI, Carlos Amadeu. Confiabilidade a quarta dimensão da qualidade, conceitos básicos e métodos de cálculo. São Paulo, 2006.

RELIABILITY HOT WIRE, *Reliasoft*. Conceitos de confiabilidade, características da distribuição de *Weibull*. Brasil: *Reliasoft*, 2005. Disponível em http://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/weibull_analysis

RIGONI, Emerson. Metodologia Científica. Curitiba: UTFPR, 2018. Apostila do curso de especialização em Engenharia de Confiabilidade. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RIGONI, Emerson. Metodologia de análise de falhas. Curitiba: UTFPR, 2018. Apostila do curso de especialização em Engenharia de Confiabilidade. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SIMONETTI, Marcelo J., SOUZA Anderson L., SILVEIRA, Luiz F. S., ARRUDA, João P. S. A importância da engenharia da confiabilidade e os conceitos básicos de distribuição de *Weibull*, 2017.