



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL - RFB
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO - MEC
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA - SEPT
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AM - IFAM
CAMPUS MANAUS-CENTRO - CMC
DEPARTAMENTO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS - DPI
COORDENAÇÃO DO CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA



DAVI SOUSA SALVIANO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO APLICADA A BOMBAS CENTRÍFUGAS NA
REFINARIA DE MANAUS (REMAN)**

MANAUS-AM

2017

DAVI SOUSA SALVIANO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO APLICADA A BOMBAS CENTRÍFUGAS NA
REFINARIA DE MANAUS (REMAN)**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – Campus Manaus-Centro, como requisito parcial obrigatório à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica sob a orientação do Prof. M. Sc. Alberto de Castro Monteiro

MANAUS-AM

2017

DAVI SOUSA SALVIANO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO APLICADA A BOMBAS CENTRÍFUGAS NA
REFINARIA DE MANAUS (REMAN)**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – Campus Manaus-Centro como requisito parcial obrigatório à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica sob a orientação do Prof. M. Sc. Alberto de Castro Monteiro

Aprovado em: 28 /06 /2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M. Sc. Alberto de Castro Monteiro
(Presidente da Banca/Orientador – IFAM/CMC)

Prof. Esp. Sidney Assis Chagas
(Examinador Interno – IFAM/CMC)

Prof. Esp. José Francisco Caldas Costa
(Examinador Interno – IFAM/CMC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, ao nosso criador e eterno pai, Deus, por ter me dado o direito à vida e a oportunidade de concluir este curso e adquirido tantos conhecimentos técnico-científicos que procurarei empregar com ética e maestria no meu cotidiano enquanto exercer a tão sonhada e honrosa profissão de Engenheiro Mecânico.

Em segundo lugar, agradeço à minha família, em especial à Dona Maria de Lourdes (minha amada mãe) pelo apoio e amor incondicionais que me foram dados durante toda a vida e todo o tempo da graduação, mesmo à distância, sem o apoio deles eu não teria chegado a este momento de conclusão deste curso, só nós sabemos as dificuldades pelas quais passei.

Por último, porém não menos importante, quero expressar aqui os meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador, Prof. M. Sc. Alberto de Castro Monteiro, que me fez escolher este tema quando assisti às suas aulas de Manutenção e Lubrificação Industrial, à Profa. Andreia Leite pela sua orientação quanto à formatação desta Monografia, ao Eng.º Guilherme Carvalho de Moraes e ao colega Técnico em Manutenção Pleno Franklim Leonardo da Silva, ambos colegas de trabalho da Gerência de Manutenção e Ativos – Equipamentos Dinâmicos da Refinaria de Manaus (REMAN), que me forneceram pequenos espaços dos seus preciosos tempos e materiais essenciais a este trabalho, à sociedade e ao IFAM pelo espaço fornecido, e, aos demais professores e colegas do IFAM/CMC que estiveram comigo durante toda a graduação.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar – Escritor Cearense)

RESUMO

O setor industrial, em especial o setor petroquímico exige cada vez mais competitividade perante os seus concorrentes, no que concerne ao custo de manutenção, custo este muitas vezes indesejável ao processo produtivo dada a sua não-aceitação por parte dos gerentes. As bombas centrífugas, por sua vez, são máquinas hidráulicas e possuem um papel muito importante na cadeia produtiva de um modo geral inserindo energia ao sistema, impulsionando os fluidos, misturando-os, dosando-os, etc. Estas bombas podem vir a falhar durante a sua operação, condição indesejável ao processo produtivo, pois pode desencadear custos incalculáveis, é aí onde entram as técnicas de manutenção preditiva, técnicas estas que procurarão prever um tempo aproximado de vida útil destes equipamentos, através da análise de vibração, termografia, análise de partículas do óleo lubrificante e/ou até mesmo dos fluidos transportados, inspeções visuais, ensaios não-destrutivos, etc. Este trabalho tem a finalidade de definir e detalhar as técnicas de manutenção preditiva realizadas nas bombas centrífugas de um planta petroquímica do município de Manaus.

Palavras-chave: Bombas Centrífugas, Manutenção Preditiva, Análise de vibração.

ABSTRACT

The industrial sector, especially the petrochemical sector, is increasingly competitive with its competitors in terms of maintenance cost, which is often undesirable for the production process given its non-acceptance by managers. Centrifugal pumps, on the other hand, are hydraulic machines and have a very important role in the production chain in general by inserting energy into the system, propelling the fluids, mixing them, dosing them, etc. These pumps can fail during their operation, undesirable condition to the productive process, since it can trigger incalculable costs, this is where the techniques of predictive maintenance enter, techniques that will try to predict an approximate life time of these equipments, through the analysis Vibration, thermography, particle analysis of lubricating oil and / or even transported fluids, visual inspections, non-destructive tests, etc. This work has the purpose of defining and detailing the predictive maintenance techniques performed in the centrifugal pumps of a petrochemical plant in the municipality of Manaus.

Keywords: Centrifugal pumps, Predictive maintenance, Vibration analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bomba Centrífuga operando em parque de bombas na Refinaria de Manaus.....	18
Figura 2 – Motor Elétrico em vista explodida.....	19
Figura 3 – Classificação dos tipos de bombas.....	20
Figura 4 – Ilustração de uma bomba de êmbolo	21
Figura 5 – Esquema de uma bomba de pistão	22
Figura 6 – Vista explodida de uma Bomba de pistão.....	23
Figura 7 – Princípios de funcionamento da bomba de diafragma	24
Figura 8 – Esquema de bomba rotativa de engrenagem.....	25
Figura 9 – Tipos de Bombas de Deslocamento Positivo.....	26
Figura 10 – Bomba de êmbolo de simples efeito	27
Figura 11 – Exemplos de bombas de deslocamento positivo. (a) Bomba de êmbolo; (b) Bomba de	28
Figura 12 – Exemplo de uma bomba de engrenagem externa.	29
Figura 13 – Exemplo de uma bomba de palheta.	30
Figura 14 – Rotores de turbo- bombas fechado, semiaberto e aberto, respectivamente.	31
Figura 15 – Bomba centrífuga em caixa, em caracol ou voluta.	32
Figura 16 – Bomba centrífuga com pás guias.	32
Figura 17 – Bomba centrífuga com rotor radial.	34
Figura 18 – Bomba centrífuga com rotor diagonal.	35
Figura 19 – Bomba centrífuga com rotor axial.	36
Figura 20 – Bomba hidráulica de estágio simples.....	37
Figura 21 – Vista explodida da bomba de simples estágio com seus respectivos componentes.....	37
Figura 22 – Bombas centrífugas de múltiplos estágios.....	38
Figura 23 – Vista explodida de bomba centrífuga multiestágios, com seus respectivos componentes.....	38
Figura 24 – Exemplo de rotor que sofreu o processo da cavitação	43
Figura 25 – Vibrações emitidas durante a operação de um máquina rotativa.....	49
Figura 26 – Fórmula da Transformada Rápida de Fourier (FFT)	50
Figura 27 – Análise do Espectro através da FFT	50
Figura 28 – Sensor de vibração	51
Figura 29 – Analisador de Vibrações Portátil da Marca CSi	52
Figura 30 - Técnico de Operação coletando dados de vibração em bomba centrífuga.....	53
Figura 31 – Caneta para coleta de dados (vibração e temperatura) da Marca SKF	54
Figura 32 – Pontos de coleta de dados de vibração em bombas centrífugas horizontais	54
Figura 33 – Inspeção visual do aspecto do óleo lubrificante.....	63
Figura 34 – Programa Básico de vigilância de equipamentos.....	64
Figura 35 – Técnicas de Manutenção Preditiva	65
Figura 36 – Bomba centrífuga operando no Parque de Bombas da REMAN.....	66
Figura 37 – Análise dos dados nos Pontos 3A, 3H e 3V do parâmetro “aceleração” no período de Fev/2014 a Fev/2016.....	67
Figura 38 – Análise dos dados nos Pontos 4H e 4V do parâmetro “aceleração” no período de Fev/2014 a Fev/2016.....	68
Figura 39 – Espectro de frequência em cascata no ponto 3H da Bomba B-621010-B	69
Figura 40 – Valores do parâmetro “aceleração” no Ponto 3A no período de 02/2014 a 01/2016	70
Figura 41 – Mancal de rolamento e suas partes construtivas	70
Figura 42 – Análise dos dados nos Pontos 3H e 3V do parâmetro “aceleração” no período de Fev/2014 a Fev/2016.....	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Estrutura e divisão do trabalho.....	2
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3 METODOLOGIA	5
3.1 Estratégia da pesquisa	5
3.2 Definição de pesquisa.....	5
3.3 Classificação e tipos de pesquisas	6
4 HISTÓRICO EVOLUTIVO DA MANUTENÇÃO	10
4.1 Introdução	10
5 TIPOS DE MANUTENÇÃO	13
5.1 Manutenção Corretiva	13
5.1.1 <i>Manutenção Corretiva Não Planejada</i>	13
5.1.2 <i>Manutenção Corretiva Planejada</i>	14
5.2 Manutenção preventiva	14
5.3 Manutenção preditiva.....	15
5.4 Manutenção detectiva.....	15
5.5 Engenharia de manutenção.....	16
6 BOMBAS INDUSTRIAIS	17
6.1 Definição	17
6.2 Formas de acionamento.....	18
6.3 Classificação geral das bombas	20
6.4 Bombas de deslocamento positivo ou volumétricas (volumógenas).....	20
6.4.1 <i>Bombas alternativas ou de êmbolo</i>	21
6.4.1.1 Bomba de Pistão.....	22
6.4.1.2 Bomba de diafragma	23
6.4.2 <i>Bombas rotativas</i>	25
6.4.2.1 Bomba de Engrenagem	29
6.4.2.2 Bomba de Palheta.....	30
6.4.3 <i>Bombas dinâmicas, centrífugas ou turbobombas</i>	30
6.4.4 <i>Classificação das Turbobombas</i>	33

6.4.5	<i>Classificação segundo a trajetória do fluido líquido no rotor</i>	33
6.4.5.1	Bomba centrífuga pura ou radial	33
6.4.5.2	Bomba de fluxo misto ou bomba diagonal	34
6.4.5.3	Bomba axial ou propulsora	35
6.4.6	<i>Classificação segundo o número de rotores empregados</i>	36
6.4.6.1	Bombas de simples estágio	36
6.4.6.2	Bomba de multiestágios ou estágios múltiplos	37
6.4.7	<i>Operação de bombas centrífugas</i>	39
6.4.8	<i>Cavitação/NPSH</i>	40
6.4.8.1	Pressão de vapor	41
6.4.8.2	O fenômeno da cavitação	41
6.4.8.3	Consequências do fenômeno da cavitação	42
7	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	44
7.1	Tipos de monitoração	44
7.2	Monitoração subjetiva	44
7.3	Monitoração objetiva	45
7.4	Monitoração contínua	45
7.5	Principais técnicas preditivas	46
7.5.1	<i>Análise de vibrações</i>	47
7.5.1.1	Conceitos iniciais	47
7.5.1.2	A Transformada Rápida de Fourier ou Fourier's Fast Transformed – FFT	49
7.5.1.3	Instrumentos de medição	51
7.5.1.4	Coleta dos dados	52
7.5.1.5	Problemas mais comuns encontrados	55
7.5.2	<i>Análise dos óleos lubrificantes</i>	62
7.5.3	<i>Análise do estado das superfícies</i>	63
7.5.4	<i>Análise estrutural</i>	64
8.1	Análise dos gráficos de tendências e espectros de vibrações	66
8.2	Correção do problema	69
8.3	Monitoramentos pós-correção	71
9	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO	75

1 INTRODUÇÃO

O mundo globalizado de hoje em dia levou-nos a uma competitividade industrial na qual o tempo passou a ser um fator de suma importância para os setores produtivos.

Neste cenário atual, a manutenção que antes não era vista como um fator contribuinte no desempenho do processo produtivo devido também à simplicidade dos processos foi conquistando seu espaço junto ao desenvolvimento tecnológico e, a complexidade das instalações industriais, sendo hoje um processo bem trabalhado, planejado de forma a aperfeiçoar a produção do bem em questão de cada empresa.

No passado, a manutenção industrial foi considerada como fator gerador de custos, muitas vezes desnecessários. Mas recentemente, a função manutenção passou a ser mais considerada no cenário de negócios industriais, pois a estratégia de manutenção do parque fabril pode influenciar positiva ou negativamente em prioridades competitivas da manufatura, tais como custo, qualidade e flexibilidade (PINJALA, et al., 2006).

As bombas centrífugas são equipamentos importantes no processo produtivo das indústrias e empresas, e são empregadas em diversos tipos de indústrias, petroquímica, siderúrgica, celulose, saneamento básico, mineradora, construção civil, entre outras.

Existem muitos tipos de bombas centrífugas com características próprias de cada uma que são direcionadas para diferentes tipos de aplicação.

A manutenção e o planejamento feitos a contento previnem que ocorram falhas e contribui para um melhor funcionamento destes equipamentos, evitando assim perdas de produção e paradas desnecessárias, culminando com custos altíssimos e incalculáveis.

As técnicas de manutenção preditiva atualmente empregadas nas indústrias e fábricas de um modo geral reduzem bastante os custos com manutenções corretivas não-planejadas, custos estes que poderiam ser minimizados se o equipamento não viesse a falhar antes do tempo previsto, acarretando em sérios problemas para a produção, tais como paradas indesejadas, acidentes com vítimas, danos a outros equipamentos e instalações, etc.

1.1 Estrutura e divisão do trabalho

1 – INTRODUÇÃO: Faz uma breve introdução ao trabalho, abordando a importância da função da manutenção no âmbito industrial e fabril de um modo geral, os custos inerentes à manutenção corretiva indesejável e o advento da manutenção preditiva. Descrevendo ainda sobre o que cada capítulo dissertará.

2 – OBJETIVOS: Trata dos Objetivos (Geral e Específicos), descrevendo-os e detalhando-os a fim de dar um norte para o presente trabalho.

3 – METODOLOGIA: Trás à tona o que se entende por Pesquisa, a sua classificação, seus tipos e quais as metodologias adotadas no presente trabalho. e toda a Revisão Bibliográfica para fundamentar este trabalho.

4 – HISTÓRICO EVOLUTIVO DA MANUTENÇÃO: Este Capítulo aborda tão somente a Revisão Bibliográfica acerca da evolução histórica da Manutenção.

5 – TIPOS DE MANUTENÇÃO: Aborda de um modo abrangente todos os tipos de Manutenção Industrial, procurando exibir seus detalhes e suas aplicações tecnológicas.

6 – BOMBAS INDUSTRIAIS: Apresenta de uma forma bastante detalhada todos os tipos de Bombas Industriais existentes, descrevendo seus aspectos construtivos, principais aplicações industriais, princípios físicos por trás do seu funcionamento e as suas subdivisões.

7 – TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA: Faz uma breve introdução às formas de acompanhamento e monitoramento dos equipamentos e suas variáveis, em seguida disserta acerca de todas as técnicas de Manutenção Preditiva existentes e aplicáveis ainda hoje.

8 – CASO PRÁTICO – SUBSTITUIÇÃO DE MANCAIS: Demonstra um caso prático da substituição de 3 mancais de uma bomba centrífuga, os mesmos estavam desgastados e já estavam no final da sua vida útil e por meio da detecção de altas vibrações emitidas pelos mesmos pôde-se perceber e comprovar a real condição dos mesmos e substituí-los.

9 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES: Aqui são tecidas as conclusões acerca de tudo o que verificou-se anteriormente e sugestões futuras para outros trabalhos sobre temas semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: Elenca todas as fontes consultadas neste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Abordar e detalhar as técnicas de manutenção preditiva empregadas em uma refinaria de petróleo no pólo industrial do município de Manaus, mais especificamente técnicas estas que virão a identificar futuras falhas em equipamentos dinâmicos, ao detectar-se estas possíveis falhas faz-se a imediata programação do serviço de troca da parte e/ou peça que possa vir a colapsar o equipamento.

2.2 Objetivos específicos

- Descrever e detalhar as técnicas de manutenção preditiva adotadas em bombas centrífugas ao longo do seu tempo de operação, estas técnicas visam maximizar o tempo de vida útil destes equipamentos dinâmicos rotativos, procurando-se reduzir ao máximo os custos com manutenções corretivas, o que é indesejável para as empresas;
- Definir e detalhar a técnica de Análise de Vibração, seus detalhes, variações e aplicações tecnológicas na Indústria de um modo geral e em casos específicos;
- Analisar e discutir o emprego desta técnica como “termômetro” das condições dos equipamentos dinâmicos aqui descritos, a sua viabilidade econômica quanto à sua utilização através de um caso prático de substituição de um mancal defeituoso.
- Demonstrar um caso prático de detecção de vibração alta emitida por mancais que estavam danificados (trincados), a sua posterior substituição por outros novos, e, o posterior monitoramento da máquina em operação constatando-se a eficácia desta técnica preditiva.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo detalhará todos os aspectos metodológicos adotados durante o trabalho aqui apresentado.

3.1 Estratégia da pesquisa

Este trabalho visa apresentar uma ferramenta útil para contribuir significativamente com o aperfeiçoamento da manutenção industrial, procurando tornar os equipamentos e instalações industriais mais disponíveis e confiáveis aos processos de um modo geral.

A priori, faz-se bastante necessário uma introdução acerca do assunto de Bombas Industriais e Técnicas de Manutenção Preditiva, para só a partir daí podermos tecer quaisquer análises e comentários sobre a Técnica de Análise de Vibração.

Diante disto, foi realizada uma Revisão Bibliográfica minuciosa onde se tratou dos seguintes assuntos:

- Histórico Evolutivo da Manutenção;
- Tipos de Manutenção existentes;
- Bombas Industriais: Princípios, Aspectos Construtivos, Tipos, Aplicações, etc.
- Técnicas de Manutenção Preditiva;

3.2 Definição de pesquisa

Antes de prosseguir na Metodologia aplicada, faz-se necessário definir o que se entende por “pesquisa”. De um modo geral, os dicionários mais consagrados no meio literário definem pesquisa como sendo a ação de busca, indagação e investigação minuciosa para averiguação da realidade, com o intuito de estabelecer fatos ou princípios relativos a um determinado campo do conhecimento. Além do mais, a definição do termo pesquisa é dada como levantamento, registro, análise, ou coleta dos fatos relacionados com os problemas de prestação de serviços.

3.3 Classificação e tipos de pesquisas

Há que se considerar diversas formas sistemáticas dos tipos de pesquisas e várias são as formas de classificá-las. Podem-se destacar algumas classificações clássicas, focando-se somente nos pontos relacionados com o objetivo metodológico deste estudo.

Quanto à natureza, as pesquisas podem ser classificadas em básicas e aplicadas; quanto à forma de abordagem, em quantitativa e qualitativa; quanto aos seus objetivos, em exploratória, descritiva e explicativa e quanto aos seus procedimentos técnicos, em bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, *ex post facto*, pesquisa ação e participante. De acordo com (SILVA e MENEZES, 2005), a pesquisa objetiva é aquela que gera conhecimentos novos dirigidos à aplicação prática e solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais e regionais.

De acordo com (GIL, 1991), do ponto de vista dos seus objetivos, a pesquisa pode ser:

- **Exploratória:** Visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torna-lo explícito. Envolve levantamento bibliográfico. Assume, em geral, as formas de Pesquisas Bibliográficas e Estudos de Casos.
- **Descritiva:** Visa descrever as características de determinada população ou fenômeno. Assume, em geral, a forma de levantamento.
- **Explicativa:** Visa identificar os fatores que determinam ou contribuem a ocorrência dos fenômenos. Aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão, o “porquê” das coisas. Quando realizada nas ciências sociais requer o uso do Método Observacional. Assume, em geral, as formas de Pesquisa Experimental e *Ex Post Facto*.

Do ponto de vista da forma de abordagem dos problemas, a pesquisa é classificada como (SILVA e MENEZES, 2005):

- **Quantitativa:** Significa traduzir, em números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas.
- **Qualitativas:** Há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito não traduzido em números, o ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são

básicas no processo de pesquisa qualitativa. É descritiva e não requer métodos e técnicas estatísticas.

Do ponto de vista dos procedimentos teóricos, (GIL, 1991), podem ser classificadas:

- **Bibliográfica:** Quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na internet.
- **Documental:** Quando elaborada a partir de materiais que não receberam o tratamento analítico.
- **Experimental:** Quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis de influência, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que variável produz no objeto.
- **Levantamento:** Quando a pesquisa envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.
- **Estudo de Caso:** Quando envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.
- **Ex Post Facto:** Quando o experimento se realiza depois dos fatos.
- **Ação:** Realiza em estreita associação com a solução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou de problemas estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.
- **Participante:** Quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas.

Dois critérios básicos para definir e classificar as pesquisas são apresentados por (VERGARA, 2003): quanto aos fins e quanto aos meios. Segundo a autora, sob esses aspectos os diversos tipos de pesquisa não são mutuamente excludentes, podendo ser, ao mesmo tempo, de tipos e finalidades diversas.

Quanto à sua finalidade, uma pesquisa pode ser:

- **Exploratória:** aquela que possui uma natureza de sondagem em uma área com pouco conhecimento acumulado.

- **Descritiva:** a pesquisa que expõe características de determinada população ou fenômeno, não possuindo compromisso de explicar os fenômenos que descreve.
- **Explicativa:** tem como objetivo principal tornar um fato ou fenômeno compreensível, justificando os motivos e esclarecendo quais fatores contribuem para a sua ocorrência.
- **Metodológica:** é aquela se refere aos instrumentos de captação ou de manipulação da realidade e está, portanto, associada a caminhos, formas e maneiras para se atingir um determinado fim.
- **Aplicada:** a que é motivada pela necessidade de resolver problemas concretos e existentes no ambiente da pesquisa. A pesquisa aplicada tem, portanto, finalidades práticas, diferentes da pesquisa pura, a qual é basicamente motivada pela curiosidade e desejo de pesquisar.
- **Intervencionista:** tem como objetivo principal interpor e interferir na realidade estudada, de forma a modifica-la.

Analisando-se as classificações propostas por (GIL, 1991) e (VERGARA,2003), pode-se chegar à conclusão de que o presente trabalho consiste numa Pesquisa de cunhos **exploratório e aplicado**.

Este trabalho é tido como **exploratório**, pois o mesmo não tem o objetivo de verificar consistências teóricas, apenas investigá-lo no seu sentido mais amplo.

Por outro lado, o mesmo é considerado como **aplicado**, já que tem o intuito de resolver problemas no setor industrial e fabril de um modo generalista.

Quanto aos meios de investigação, a pesquisa pode ser (GIL, 1991):

- **De Campo:** pesquisa de investigação empírica, realizada no local onde ocorreu um fenômeno ou que dispõe de elementos para explicá-lo.
- **De Laboratório:** é aquela realizada em local circunscrito, normalmente envolvendo simulações.
- **Documental:** aquela na qual a investigação é realizada com base na análise dos conteúdos dos documentos.

- **Bibliográfica:** é o estudo sistematizado desenvolvido mais fortemente com base a matérias publicadas por outros pesquisadores.
- **Experimental:** investigação empírica na qual o pesquisador manipula e controla as variáveis independentes e observa as mudanças nas variáveis dependentes.
- **Ex Post Facto:** pesquisa referente a um fato já ocorrido, o qual o pesquisador não pode manipular ou controlar as variáveis.
- **Participante:** pesquisa que não se esgota na figura do pesquisador e da qual tomam parte pessoas implicadas no problema.
- **Pesquisa-ação:** é um tipo específico de pesquisa participante que supõe intervenção participativa na realidade social.
- **Estudo de caso:** é o circunscrito a uma ou poucas unidades, com caráter de profundidade e detalhamento.

De acordo com os tipos de investigação, pode-se classificar o presente trabalho como sendo dos tipos: **De Campo e Bibliográfica.**

De acordo com as anotações de (VERGARA, 2003), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material acessível ao público em geral, isto é, publicado em livros, revistas, relatórios técnicos e mídia eletrônica.

Em suma, pode-se dizer que este trabalho foi desenvolvido por uma metodologia de pesquisas **exploratória e aplicada**, com metodologia investigativa de caráter **bibliográfico e de campo**, com estudos de procedimentos técnicos baseados nas literaturas existentes e citados ao final do trabalho.

4 HISTÓRICO EVOLUTIVO DA MANUTENÇÃO

4.1 Introdução

Nos primórdios a produção industrial não era executada de forma racional, os serviços eram apenas baseados na manutenção corretiva não planejada, as equipes de manutenção não existiam. A maior parte dos reparos era executada pelo pessoal que tinha a tarefa de apenas produzir, e restabelecia o que se quebrava, e lubrificava as unidades quando julgava adequado. De acordo com (BRANCO,2008). “A administração industrial forçava as equipes de manutenção a se preocuparem em sanar rapidamente as falhas e a efetuarem serviços que evitassem e prevenisse a ocorrência das falhas nos equipamentos mais importantes”.

4.2 Histórico da Manutenção

De acordo com (PINTO e XAVIER, 2012), as indústrias, as fábricas antigamente não eram como as de hoje em dia, não se tinham rotinas nem planejamento de manutenção, quem operava uma máquina também era incumbido de consertá-la quando esta quebrasse.

Não era necessária uma manutenção sistematizada, apenas serviços de limpeza e lubrificação eram planejados e os reparos sempre ocorriam após a quebra, ou seja, a manutenção era fundamentalmente, corretiva não planejada. A visão em relação às falhas dos equipamentos era a de que “todos os equipamentos se desgastavam com o passar dos anos, vindo a sofrerem falhas ou quebras”. A competência que se buscava era basicamente a habilidade de executante em realizar o reparo necessário.

Assim foi classificada a *primeira geração* da manutenção que abrange o período antes da Segunda Guerra Mundial, quando a indústria era pouco mecanizada, os equipamentos eram simples, e, na sua grande maioria superdimensionados.

A partir dos anos 50 começa-se a evidenciar a necessidade de maior disponibilidade, na busca de maior produtividade; a indústria estava bastante dependente do bom funcionamento das máquinas. Isto levou à ideia de que falhas e defeitos dos equipamentos poderiam e deveriam ser evitados, o que resultou no conceito de manutenção preventiva marcando então a *segunda geração* da manutenção, (PINTO e XAVIER, 2012).

Com o objetivo de intervir cada vez menos na planta as práticas de manutenção preditiva e monitoramento de condição de equipamentos e do processo são cada vez mais utilizadas. Redução

da manutenção preventiva e corretiva não planejada. Uma das grandes mudanças na prática da manutenção é o aprimoramento da contratação ou da terceirização buscando contratos de longo prazo, em uma relação de parceria, com indicadores que medem os resultados que interessam ao negócio, disponibilidade e confiabilidade.

Na *quinta geração* as práticas adotadas na *quarta geração* são mantidas, mas o enfoque nos resultados empresariais, razão principal para obtenção da competitividade, necessária à sobrevivência da empresa, é obtido através do esforço conjunto em todas as áreas coordenadas pela sistemática da Gestão de Ativos.

Pela Gestão de Ativos (Asset Management), os ativos devem produzir na sua capacidade máxima, sem falhas não previstas, de modo que seja obtido o melhor Retorno sobre os Ativos (ROA- Return on Assets) ou Retorno sobre os investimentos (ROI - Return on Investment).

➤ **Em relação à manutenção ocorrem:**

- 1 – Aumento da manutenção Preditiva e Monitoramento da condição on-line e off-line.
- 2 – Participação efetiva no projeto, aquisição, instalação, comissionamento, operação e manutenção dos ativos. Esse enfoque significa ter o domínio de todo ciclo de vida dos ativos.
- 3 – Monitoramento da performance de modo a garantir que os ativos operem dentro de sua máxima eficiência.
- 4 – Constante implementação de melhorias objetivando redução de falhas.
- 5 – Aprimoramento na relação entre departamentos como requisito fundamental para que a Gestão de Ativos seja praticada.
- 6 – Excelência em Engenharia de Manutenção.
- 7 – Consolidação da necessidade da boa prática gerencial
- 8 – Consolidação da contratação por resultados.

O Quadro 1 demonstra os aspectos e as características de cada geração de Manutenção.

Quadro 1 – Evolução da Manutenção.
(Fonte: PINTO e XAVIER, 2012).

Geração	Primeira Geração		Segunda Geração		Terceira Geração		Quarta Geração		Quinta Geração	
	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2015
Aumento das expectativas Em relação à Manutenção.	-Conserto após a falha		-Disponibilidade crescente -Maior vida útil do equipamento		-Maior confiabilidade -Maior disponibilidade -Melhor relação custo-benefício -Preservação do meio ambiente		-Maior confiabilidade -Maior disponibilidade -Preservação do meio – ambiente -Segurança -Gerenciar ativos -Influir nos resultados do negócio		-Gerenciar os ativos -Otimização dos ciclos de vida dos ativos -Influir nos resultados do negócio	
Visão quanto à falha do ativo	-Todos os equipamentos se desgastam com a idade e por isso falham		-Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira		-Existência de seis padrões de falhas		-Reduzir drasticamente falhas prematuras		-Planejamento do ciclo de vida desde o projeto para reduzir falhas	
Mudança nas técnicas de manutenção	-Habilidades voltadas para o reparo		-Planejamento manual da manutenção -Computadores grandes e lentos -Manutenção preventiva (por tempo)		-Monitoramento da condição -Manutenção preditiva -Análise de risco -Computadores pequenos e rápidos -Softwares potentes -Grupos de trabalho disciplinares -Projetos voltados para a confiabilidade		-Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição -Redução nas manutenções preventiva e corretiva não planejada -Análise de falhas -Técnicas de confiabilidade -Manutenibilidade -Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. -Contratação por resultados		-Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição <i>on</i> e <i>off-line</i> -Participação efetiva no projeto, aquisição, instalação, comissionamento, operação e manutenção dos ativos. -Garantir que os ativos operem dentro de sua máxima eficiência -Implementar melhorias objetivando redução de falhas -Excelência em engenharia de manutenção -Consolidação da contratação por resultados	

5 TIPOS DE MANUTENÇÃO

5.1 Manutenção Corretiva

De acordo com (BRANCO, 2008) “Manutenção corretiva é toda atividade de manutenção realizada em uma máquina que esteja em falha”.

Do ponto de vista do custo de manutenção, a corretiva é mais barata do que prevenir as falhas. Em compensação, pode causar grandes perdas por interrupção da produção, a opção por este método deve-se levar em conta os fatores econômicos. (XENOS, 2004).

Conforme (PINTO e XAVIER, 2012), existem duas circunstâncias específicas que levam à manutenção corretiva:

- a) Desempenho deficiente apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais;
- b) Ocorrência da falha.

A manutenção corretiva segundo os mesmos autores pode ser dividida em duas classes:

- Manutenção corretiva não planejada;
- Manutenção corretiva planejada.

5.1.1 *Manutenção Corretiva Não Planejada*

É baseado em agir num fato já ocorrido, nesse caso como o próprio nome adverte, não há tempo para preparação e planejamento dos serviços. Se a falha que não puder ser adiada ou planejada deve ser considerada como manutenção corretiva não planejada ou de emergência, ou seja, aconteceu agora e preciso fazer agora. (BRANCO, 2008).

Infelizmente ainda é praticado por diversas empresas, implicando indiretamente em custos elevados, sem contar nas perdas por produção e qualidade.

Assim salienta (PINTO e XAVIER, 2012) que:

“Quando uma empresa tem a maior parte de sua manutenção corretiva na classe não planejada, seu departamento de manutenção é comandado pelos equipamentos e o desempenho empresarial da Organização, certamente, não está adequado às necessidades de competitividade atuais.”

5.1.2 *Manutenção Corretiva Planejada*

De acordo com (PINTO e XAVIER, 2012),

”Manutenção Corretiva Planejada é a correção do desempenho menor que o esperado ou da falha, por DECISÃO GERENCIAL, isto é, pela atuação em função de acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a quebra.”

É caracterizado pela ação de correção do desempenho menor que o esperado baseado no acompanhamento dos parâmetros de condição e diagnósticos levados a efeito pela Preditiva, Detectiva e Inspeção. Com o monitoramento dos parâmetros do equipamento é possível detectar quando ocorrerá a falha. E então fazer o planejamento da manutenção.

Um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido e mais seguro do que um trabalho não planejado. E será sempre de melhor qualidade.

5.2 Manutenção preventiva

Inversamente à política de Manutenção Corretiva, a Manutenção Preventiva procura obstinadamente evitar a ocorrência de falhas, ou seja, procura prevenir.

Trata-se de atuação realizada de maneira a reduzir ou evitar a falha ou a queda no desempenho do equipamento, obedecendo a um plano de manutenção preventiva previamente elaborada, baseado em intervalos definidos de tempo, isso é, manutenção baseada no tempo.

A manutenção preventiva é caracterizada pelo trabalho sistemático para evitar a ocorrência de falhas procurando a sua prevenção, mantendo um controle contínuo sobre o equipamento. A manutenção preventiva é considerada como o ponto de apoio das atividades de manutenção, envolvendo tarefas sistemáticas tais como: as inspeções, substituição de peças e reformas (PATTON JR., 1983).

Fatores que devem ser levados em consideração para adoção de uma política de manutenção preventiva:

- 1-Quando não é possível a manutenção preditiva.
- 2-Quando existirem aspectos relacionados com a segurança pessoal ou da instalação que tornam mandatória a intervenção, normalmente para substituição de componentes.

- 3-Por oportunidade, em equipamentos críticos de difícil liberação operacional.
- 4-Quando houver riscos de agressão ao meio ambiente
- 5- Em sistemas complexos e/ou de operação contínua.

A manutenção preventiva será tanto mais conveniente quanto maior for simplicidade na reposição; quanto mais altos forem os custos de falhas prejudicarem a produção e quanto maiores forem às implicações das falhas na segurança pessoal, operacional e ambiental.

A manutenção preventiva proporciona um conhecimento prévio das ações, permitindo uma boa condição de gerenciamento das atividades e nivelamento de recursos, além de previsibilidade de consumo de materiais e sobressalentes, porém como qualquer outro tipo de manutenção possui alguma desvantagem que é a retirada do equipamento ou sistema de operação para execução dos serviços programados podendo serem introduzidos de certa forma por falha humana, contaminação no sistema de óleo ou falha de sobressalentes defeitos não existentes no equipamento.

5.3 Manutenção preditiva

Também é conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É baseada na tentativa de definir o estado futuro de um equipamento ou sistema, por meio dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento. O acompanhamento de parâmetros é o principal indicativo para identificação da condição do equipamento. Por isso, alguns indicadores importantes tais como: temperatura, pressão, vibração, vazão, ruídos, vazamentos, desgastes e corrosão servem como subsídios à antecipação das falhas em equipamentos.

O objetivo da manutenção preditiva não é eliminar os níveis de manutenção preventiva ou corretiva, mas minimizá-los de forma prática, técnica e objetiva, por meio do acompanhamento e/ou monitoração de parâmetros, com uso de instrumentação adequada.

5.4 Manutenção detectiva

Manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação manutenção. Esse sistema de detecção é observado cada vez mais por computadores digitais em instrumentação (sistemas

digitais de controle distribuídos – SDCD¹). É primordial para garantir a confiabilidade e deve ser interpretado por pessoal treinado. Comparado com a manutenção preditiva, em que é necessário o diagnóstico a partir de parâmetros, na manutenção detectiva, o diagnóstico é definido após o processamento das informações colhidas na planta.

5.5 Engenharia de manutenção

É a segunda quebra de paradigma na Manutenção, praticar a Engenharia de Manutenção significa uma mudança cultural. É o suporte técnico da manutenção e está dedicado a:

- Consolidar a rotina.
- Implantar a melhoria.

É deixar de ficar consertando continuamente, para procurar as causas básicas, modificar situações permanentes de mau desempenho, deixar de conviver com problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, desenvolver a manutenibilidade, dar *feedback*² ao projeto, interferir tecnicamente nas compras.

Principais atribuições

- Aumentar a confiabilidade;
- Aumentar a disponibilidade;
- Melhorar a manutenibilidade;
- Aumentar a segurança, entre outros.

Engenharia de Manutenção significa perserguir *benchmark*³, aplicar técnicas modernas, estar nivelado com a manutenção do Primeiro Mundo.

¹ Equipamento da área de automação industrial que tem como função primordial o controle de processos de forma a permitir uma otimização da produtividade industrial.

² Termo em inglês que tem como significado realimentar ou dar resposta a um determinado pedido ou acontecimento.

³ A busca das melhores práticas na indústria que conduzem ao desempenho superior (Referencial de Qualidade).

6 BOMBAS INDUSTRIAIS

6.1 Definição

Bombas são máquinas operatrizes hidráulicas que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Recebem energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte desta energia ao fluido sob forma de energia de pressão, energia cinética ou ambas, isto é, aumentam a pressão do líquido, a velocidade ou ambas as grandezas.

As bombas são classificadas dum modo geral em:

Não existe uma terminologia homogênea sobre as bombas, pois existe vários critérios para designá-las; entretanto, pode-se classificá-las em duas grandes categorias:

a) Bombas centrífugas (também chamadas Turbo-bombas);

b) Bombas volumétricas ou de deslocamento positivo

Dimensionamento de Bombas: As bombas são, em sua grande maioria, especificadas pela capacidade de pressão máxima de operação e pelo seu deslocamento, em litros por minuto, em uma determinada rotação por minuto.

Intervalo de Pressão: O range de pressão de uma bomba é determinado pelo fabricante, baseado no tempo de vida útil da bomba.

Importante: Se, por acaso, uma bomba entrar em operação com pressões superiores às estipuladas pelo fabricante, sua vida útil se reduzirá gradativamente.



Figura 1 – Bomba Centrífuga operando em parque de bombas na Refinaria de Manaus.
(Fonte: Autor).

6.2 Formas de acionamento

As principais formas de acionamento são:

- motores elétricos (forma mais usual) – Vide Figura 2;
- motores de combustão interna (por ex.; Diesel, muito utilizado em sistemas de irrigação e, bombas de combate a incêndio);
- turbinas (em sua grande maioria, turbinas a vapor).

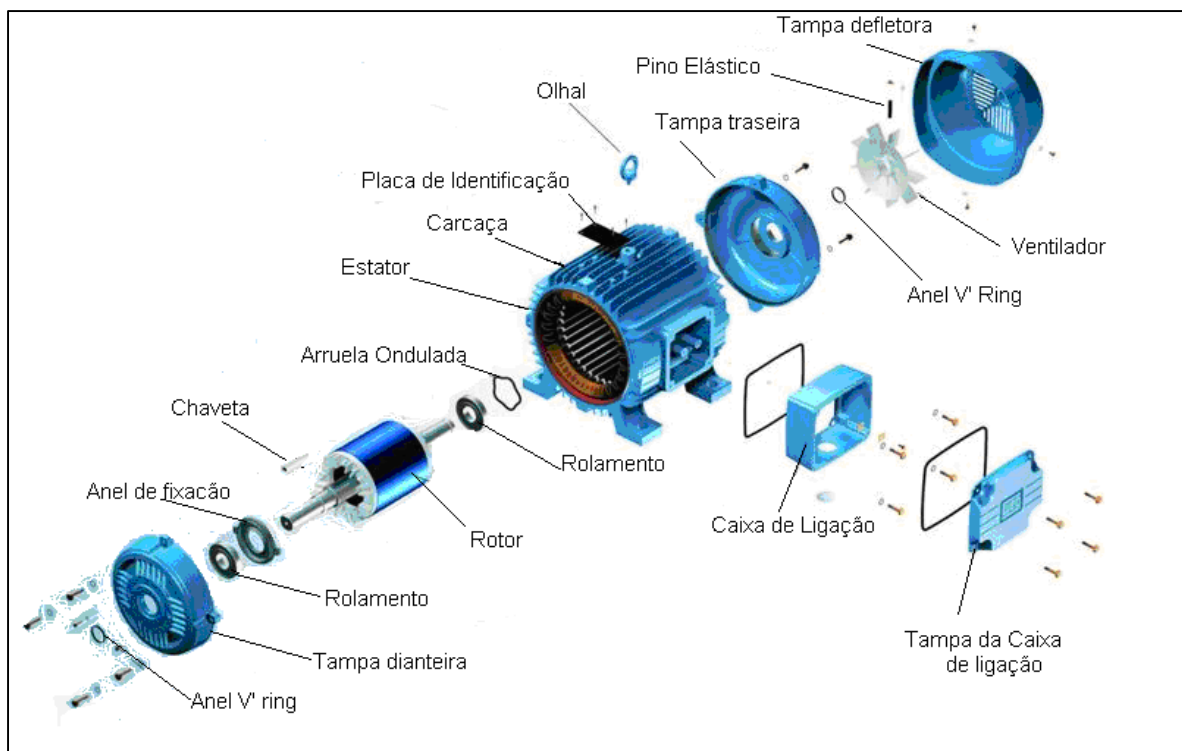


Figura 2 – Motor Elétrico em vista explodida
(Fonte: Manual WEG, 2012).

O projeto de escolha e dimensionamento do órgão impulsor está correlacionado diretamente a vários aspectos, dentre todos, pode-se citar alguns:

- Quanto custa a energia e o quanto esta energia está disponível;
- O quão seguro e cômodo é este equipamento pras instalações;
- O grau de interesse de mover os determinados fluidos em questão.

De uma maneira geral, a soma dos principais fatores provoca, na maioria dos casos, uma convergência ao uso dos motores elétricos. São causas desta tendência, entre outras:

- Uma vida útil mais prolongada;
- Maior segurança e comodidade operacional (estes equipamentos não provocam poluição ambiental);
- Custo de manutenção bem menor se comparado aos demais equipamentos.

6.3 Classificação geral das bombas

Então, sabendo que as Bombas são máquinas acionadas que recebem energia mecânica de uma fonte motora (máquina acionadora) e a transformam em energia cinética (movimento), ou energia de pressão (força), ou ambas, e as transmitem ao líquido, a Figura 3 nos mostra esquematicamente as diferenças entre os dois tipos de bombas industriais existentes.

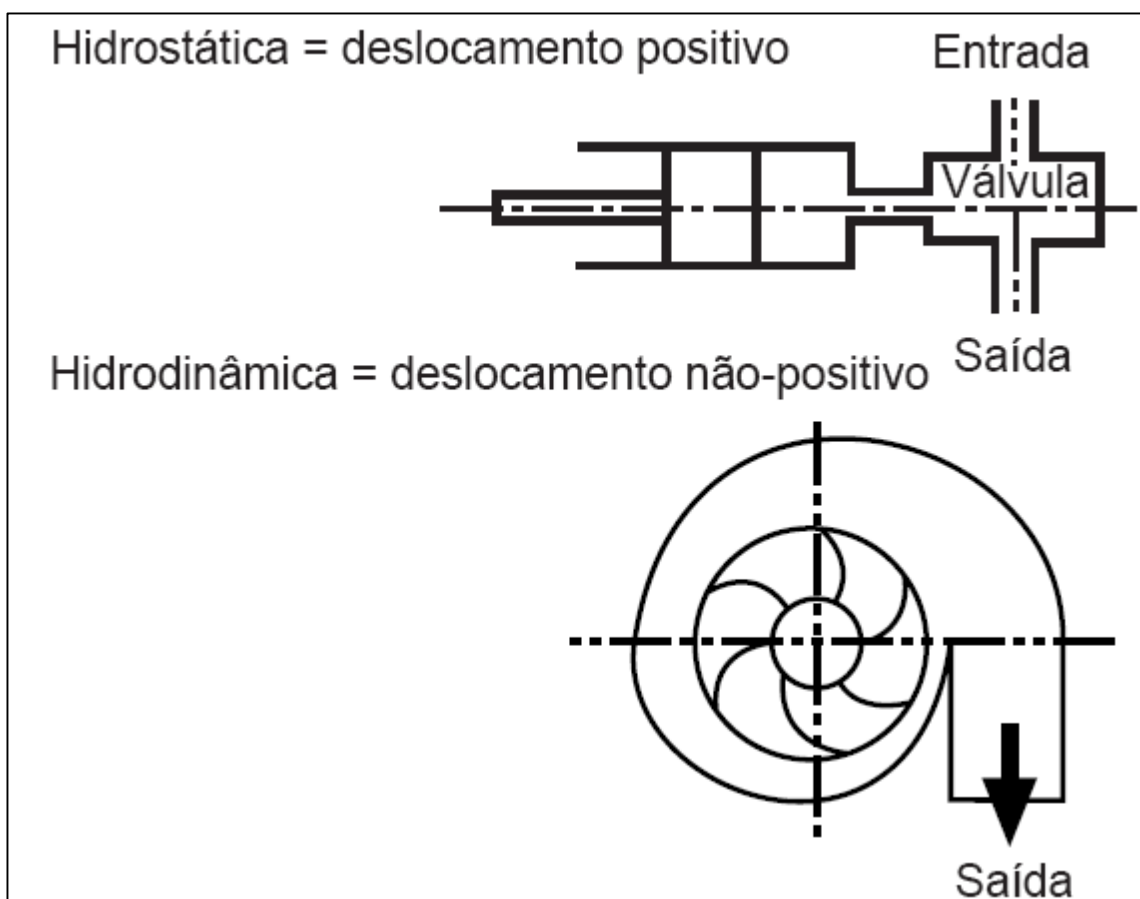


Figura 3 – Classificação dos tipos de bombas
(Fonte: BRASIL, 2013).

6.4 Bombas de deslocamento positivo ou volumétricas (volumógenas)

Este tipo de máquina tem por característica de funcionamento a transferência direta da energia mecânica cedida pela fonte motora em energia potencial (energia de pressão). Esta transferência é obtida pela movimentação de um órgão mecânico da bomba, que obriga o fluido a executar o mesmo movimento do qual ele está animado.

O líquido, sucessivamente enche e depois é expulso dos espaços com volume determinado no interior da bomba, daí resultando o nome de bombas volumétricas.

A variação destes órgãos mecânicos (êmbolos, diafragma, engrenagens, parafusos, etc.) ,é responsável pela variação na classificação das bombas volumétricas ou de deslocamento positivo, as quais dividem-se em:

- (a) Bombas de êmbolo ou Alternativas (pistão, diafragma);**
- (b) Rotativas (engrenagens, lóbulos, palhetas, helicoidais, fusos, parafusos, peristálticas).**

6.4.1. Bombas alternativas ou de êmbolo

O órgão impulsor pode ser um pistão ou um diafragma.

No caso das bombas de êmbolo ou pistão, um eixo excêntrico gira e provoca o movimento alternativo do pistão, como se pode ver na Figura 4.

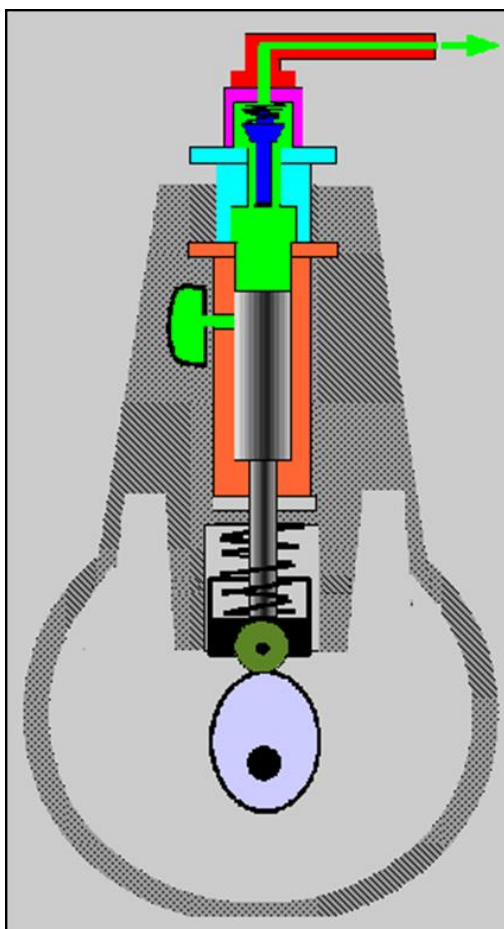


Figura 4 – Ilustração de uma bomba de êmbolo
(Fonte: HORTA, 2015)

6.4.1.1 Bomba de Pistão

O impelidor é um pistão que se desloca dentro de um cilindro. Durante o movimento de aspiração diminui a pressão na câmara, abre-se a válvula direcional de entrada e o líquido é admitido. Em seguida, pelo movimento de recalque do pistão, a pressão aumenta, abre-se a válvula direcional de saída e o líquido é expulso do cilindro conforme mostra a Figura 5.

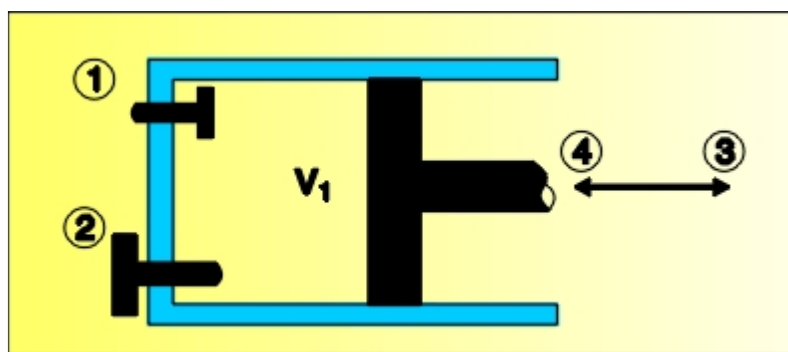


Figura 5 – Esquema de uma bomba de pistão
(Fonte: KSB, 1991)

Onde:

- 1 - Válvula de Admissão
- 2 - Válvula de Descarga
- 3 - Movimento de Aspiração
- 4 - Movimento de Descarga

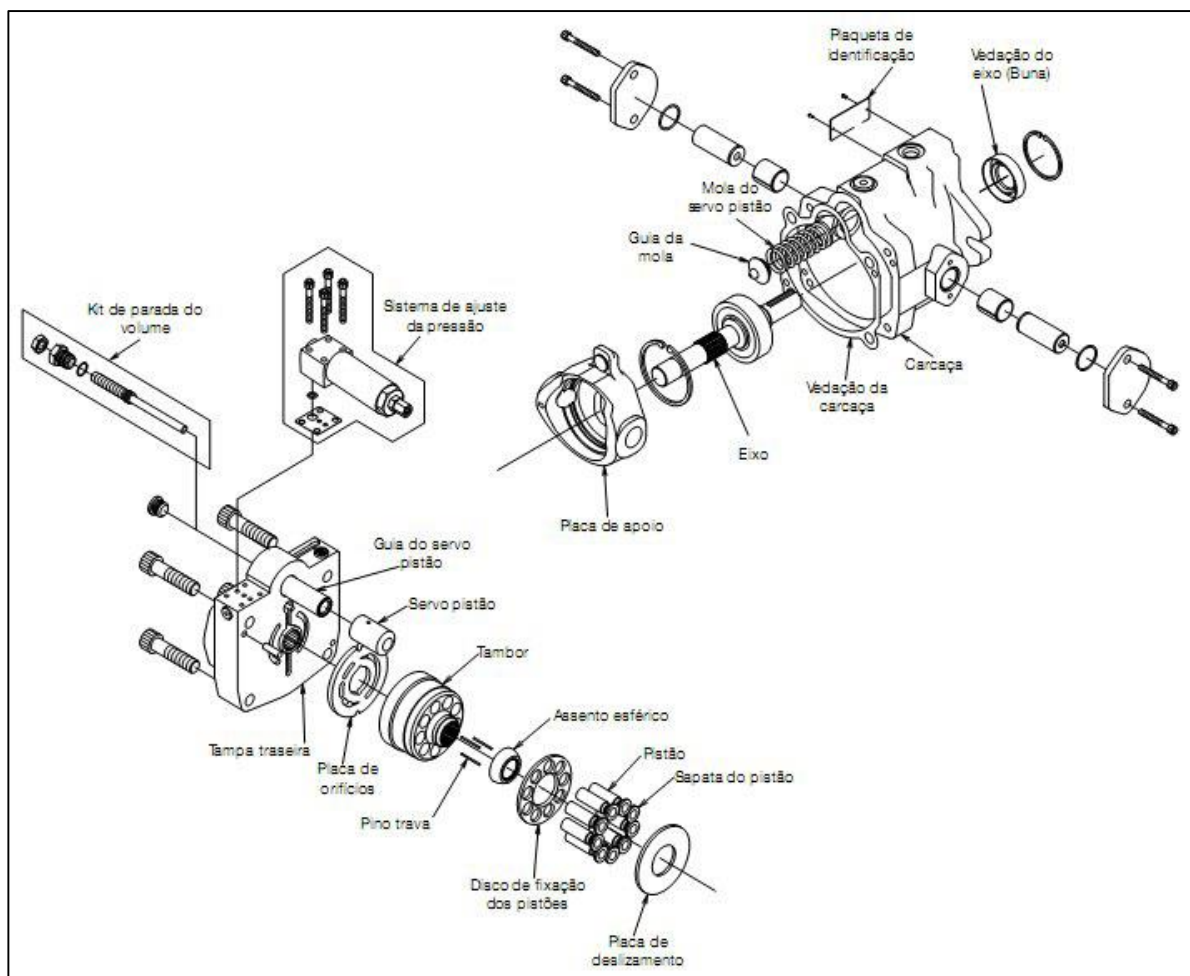


Figura 6 – Vista explodida de uma Bomba de pistão.
(Fonte: BRASIL, 2013)

6.4.1.2 Bomba de diafragma

As bombas de diafragma pneumática (necessita de ar comprimido para o seu funcionamento), funcionam pela ação de um diafragma que são membranas de borracha resistente e de grande flexibilidade (Figura 7). Este tipo de bomba oferece a vantagem de não haver contato com o produto que está sendo bombeado e o sistema de acionamento, o que elimina o risco de vazamento e incorporação de ar no produto. A desvantagem é que a sua capacidade manométrica é limitada não atingindo grande altura na elevação do produto.

Mesma assim é bastante utilizada no transporte de produtos com viscosidade não muito elevada como: maionese, xaropes de açúcar, molhos de tomate, cremes, polpas, etc.

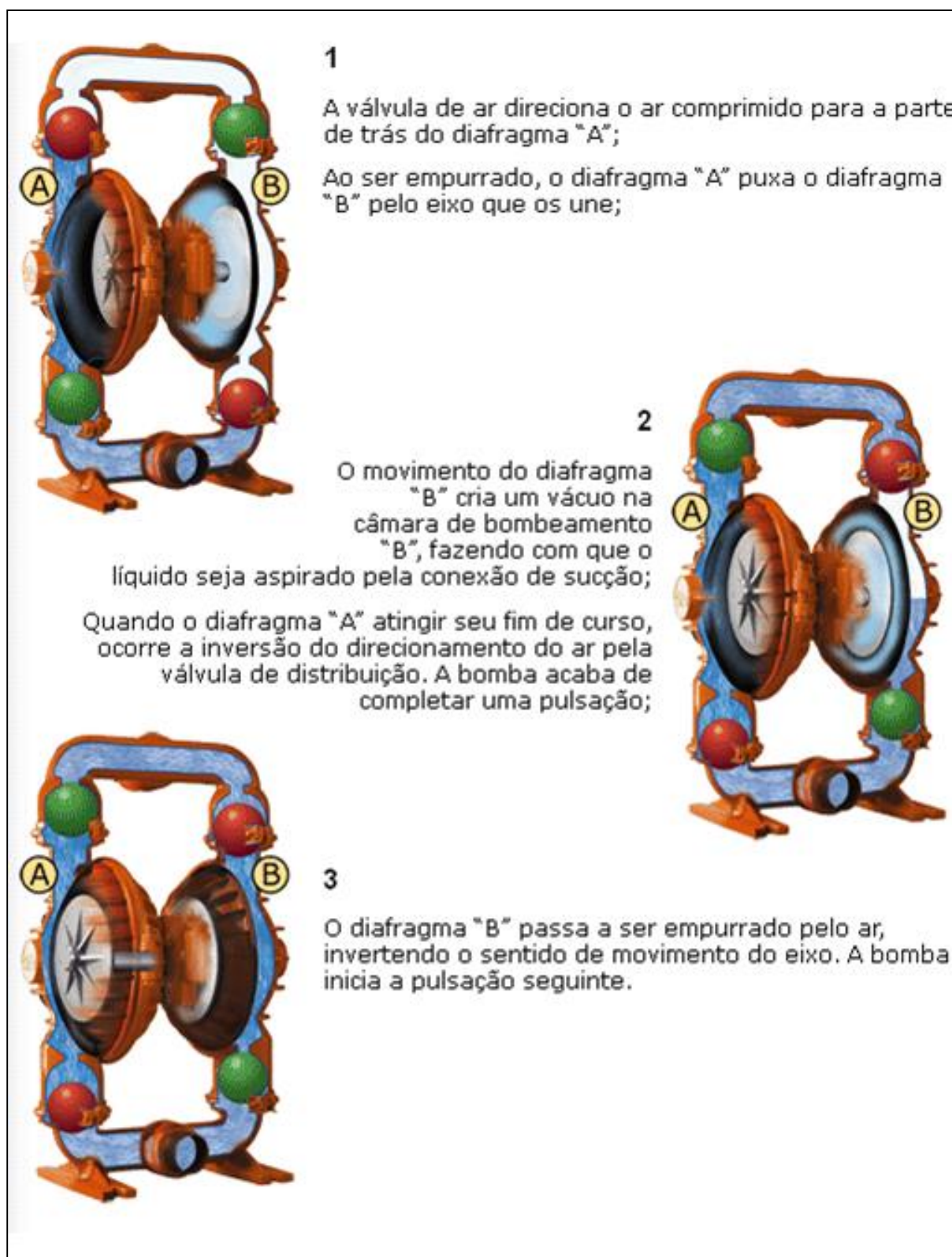


Figura 7 – Princípios de funcionamento da bomba de diafragma
(FONTE: HORTA, 2015)

6.4.2 Bombas rotativas

A denominação genérica Bomba Rotativa, designa uma série de bombas volumétricas comandadas por um movimento de rotação, daí a origem do nome.

As bombas rotativas podem ser de parafusos (screw pumps), engrenagens, palhetas, lóbulos, entre outras, conforme demonstra a Figura 8 abaixo:

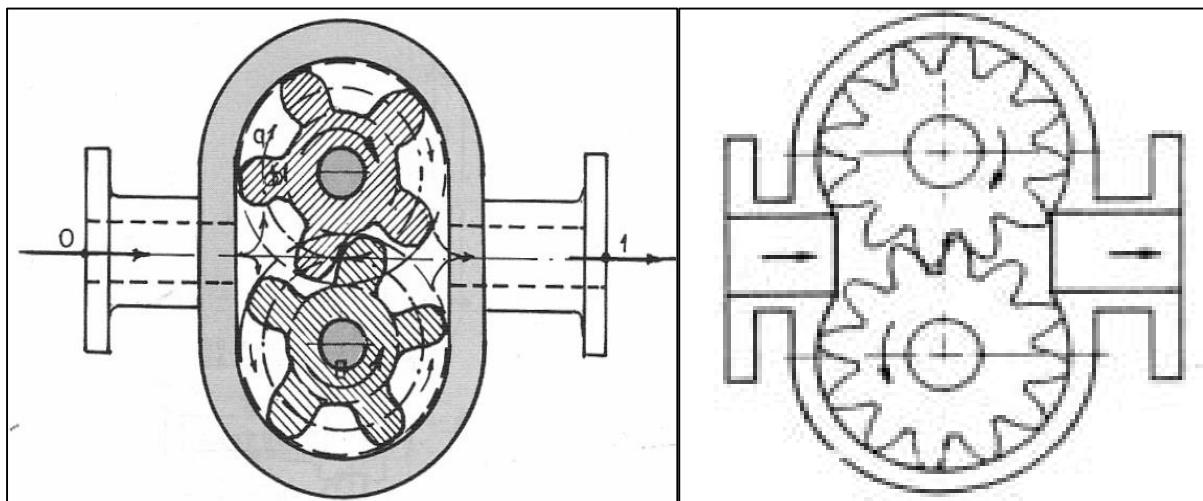


Figura 8 – Esquema de bomba rotativa de engrenagem.
(Fonte: BRASIL, 2013)

O funcionamento volumétrico de todas elas consiste no preenchimento dos interstícios (espaços vazios) entre o componente girante e a carcaça, sendo que a somatória de todos eles, menos o vazamento natural (recirculação), corresponde à vazão total fornecida pela bomba.

Nestas bombas, quando a velocidade é constante, a descarga e a pressão são praticamente constantes, embora rigorosamente falando, haja apenas flutuações.

O quadro abaixo esboça os tipos de bombas de deslocamento positivo:

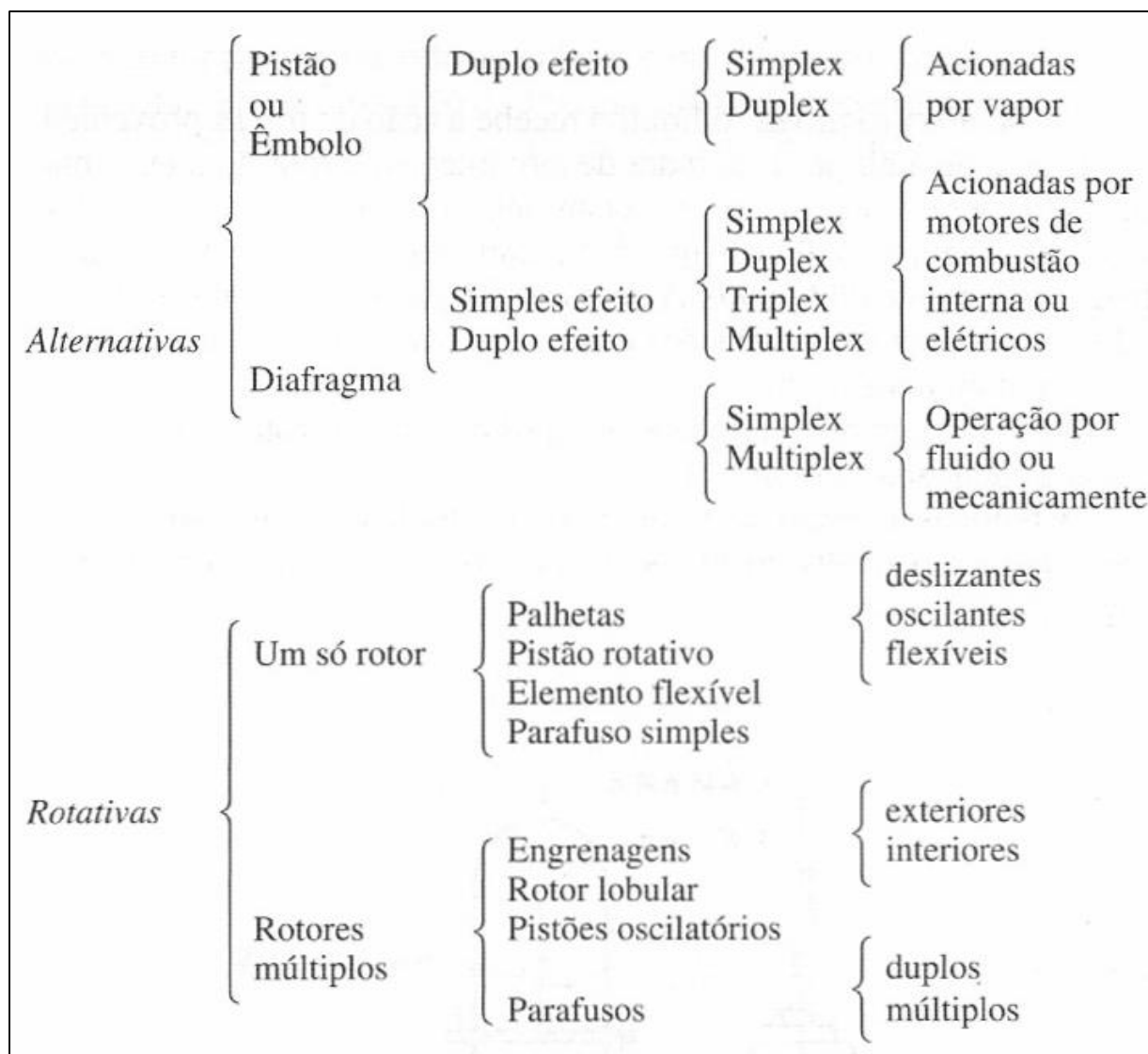


Figura 9 – Tipos de Bombas de Deslocamento Positivo
(Fonte: BRASIL, 2013)

Verifica-se uma relação constante entre o recalque da bomba e a velocidade do órgão propulsor da bomba, nas bombas volumógenas.

Já no caso das bombas alternativas, o líquido recebe a ação das forças diretamente de um pistão ou de um êmbolo (pistão alongado) ou de uma membrana flexível (diafragma).

Podem ser de:

Efeito simples – quando apenas uma face do êmbolo atua sobre o líquido (Fig.10).

Efeito duplo – quando as duas faces atuam..

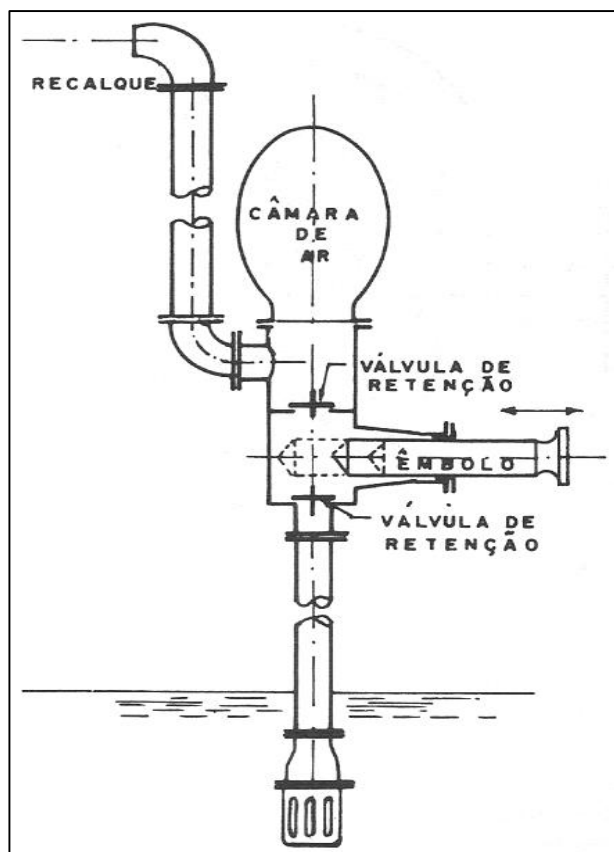


Figura 10 – Bomba de êmbolo de simples efeito
(Fonte: BRASIL, 2013)

A denominação genérica Bomba Rotativa, designa uma série de bombas volumétricas comandadas por um movimento de rotação, daí a origem do nome.

As bombas rotativas podem ser de parafusos (screw pumps), engrenagens, palhetas, lóbulos, entre outras. Podem ser de um ou mais rotores.

As bombas alternativas e rotativas são usadas para pressões elevadas e descargas relativamente pequenas.

Há grande variedade de bombas volumétricas, são elas as indicadas na Fig. 11.

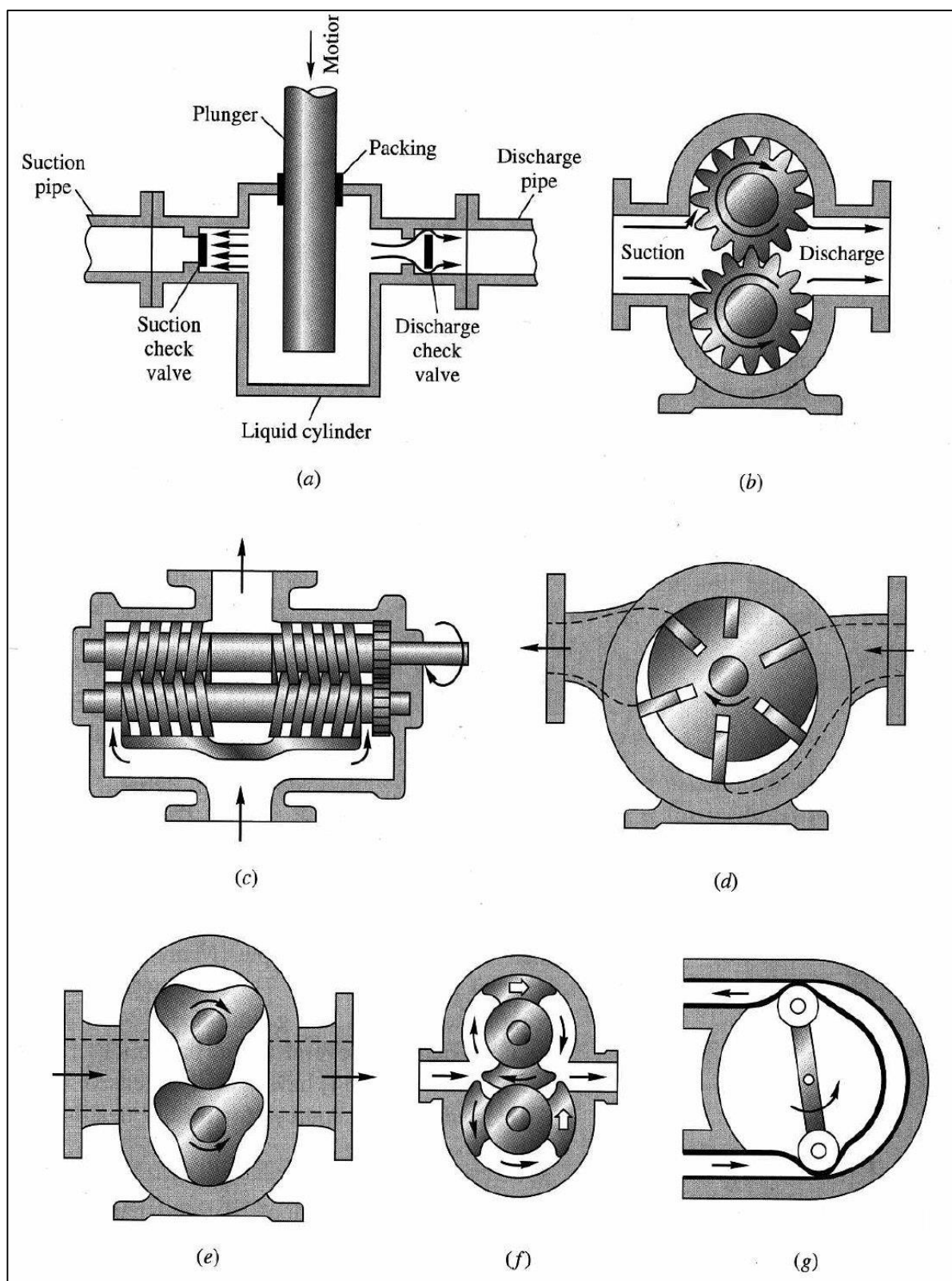


Figura 11 – Exemplos de bombas de deslocamento positivo. (a) Bomba de êmbolo; (b) Bomba de engrenagens; (c) Bomba helicoidal; (d) Bomba de palhetas; (e) Bomba de lóbulos triplos; (f) Bomba de pistão duplo circunferencial; (g) Bomba de tubo flexível ou de rolete. (Fonte: BRASIL, 2013)

6.4.2.1 Bomba de Engrenagem

As bombas de engrenagens consistem de uma carcaça com orifícios de entrada e saída e de um mecanismo de bombeamento composto por duas engrenagens, onde uma é ligada ao eixo acionador (engrenagem motora) e a outra é a engrenagem movida. A figura abaixo exemplifica o funcionamento de uma bomba de engrenagem interna.

Já as bombas de engrenagem externa, possuem a estrutura como na figura abaixo. O fluido entra pelo lado de sucção e preenche o espaço entre os dentes e a carcaça, sendo conduzido, pelo engrenamento e desengrenamento dos dentes, até o lado de descarga. São usadas para bombear parafina, sabão, graxas, etc.

O equipamento descrito acima é uma bomba de engrenagem externa, isto é, ambas as engrenagens têm dentes em suas circunferências externas, conforme apresentado na Figura 12.

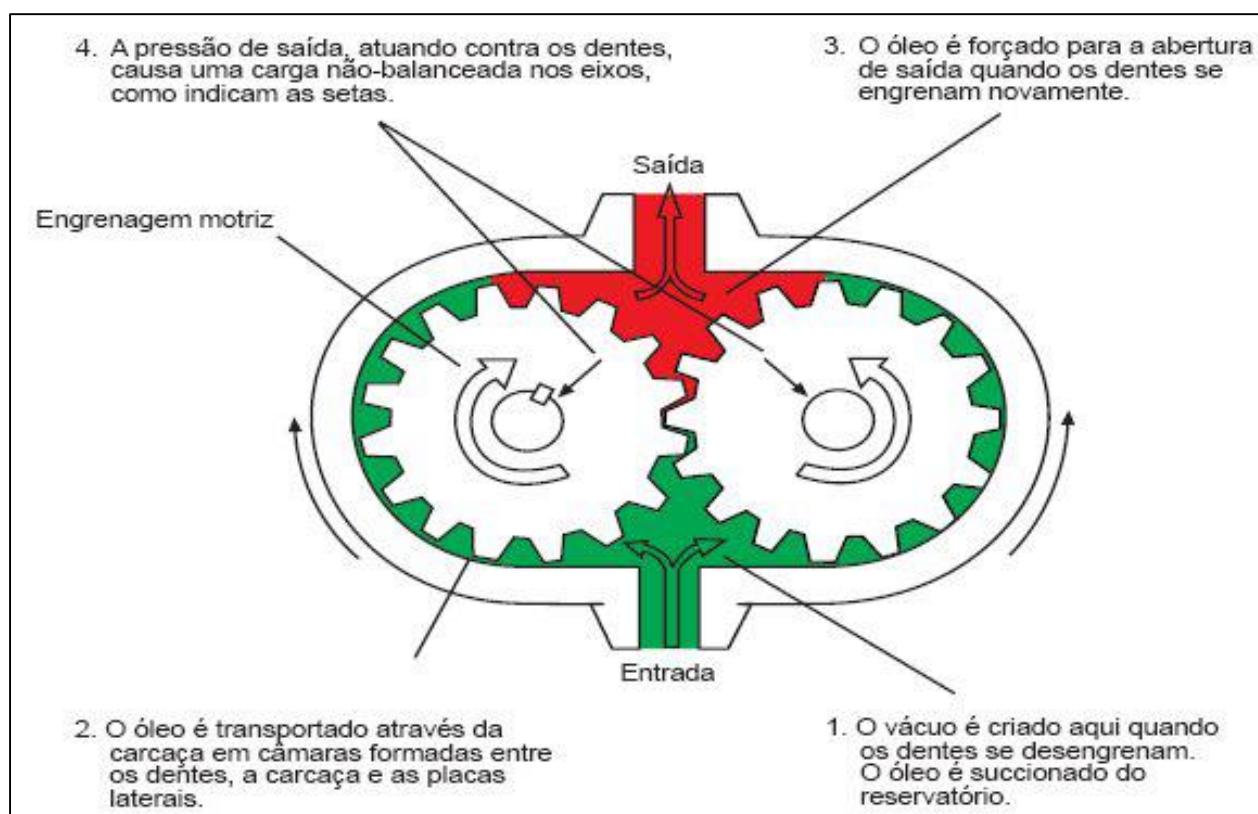


Figura 12 – Exemplo de uma bomba de engrenagem externa.
(Fonte: BRASIL, 2013)

6.4.2.2 Bomba de Palheta

As bombas de palhetas são compostas por um rotor cujo eixo de rotação é excêntrico ao eixo da carcaça. Produzem uma ação de bombeamento que faz as palhetas acompanharem o contorno de um anel ou da carcaça.

Devido à rotação do rotor a força centrífuga projeta as palhetas contra a carcaça, formando câmaras que aprisionando o fluido.

O rotor de uma bomba de palheta suporta as palhetas e é ligado a um eixo que é conectado a um acionador principal. À medida que o rotor é girado, as palhetas são “expulsas” por inércia e acompanham o contorno do cilindro (o anel não gira). Quando as palhetas fazem contato com o anel, é formada uma vedação positiva entre o topo da palheta e o anel. O rotor é posicionado fora do centro do anel. Vide Figura 13.



Figura 13 – Exemplo de uma bomba de palheta.
(Fonte: BRASIL, 2013)

6.4.3 Bombas dinâmicas, centrífugas ou turbobombas

A energia fornecida ao fluido, nesse caso, é do tipo cinética, que é convertida em energia potencial (de pressão). Essa energia pode ter origem puramente centrífuga ou de arrasto, ou até mesmo uma combinação destas.

A movimentação do fluido ocorre pela ação de forças que se desenvolvem na massa fluídica, em consequência do movimento rotacional de um eixo no qual é acoplado um rotor (impulsor, impelidor). O rotor recebe o fluido pelo centro e o expulsa para a periferia – com o auxílio de pás (palhetas, hélices) de direcionamento.

A finalidade do rotor, também chamado “impulsor” ou “impelidor”, é comunicar à massa líquida aceleração, para que adquira energia cinética e se realize assim a transformação da energia mecânica de que está dotado, É, em essência, um disco ou uma peça de formato cônico dotada de pás. O rotor pode ser.

- Fechado: (Fig. 3.14 a) quando, além do disco onde se fixam as pás, existe uma coroa circular também presa às pás. Pela abertura dessa coroa, o líquido penetra no rotor. Usa-se para líquidos sem substâncias em suspensão e nas condições que veremos adiante;
- Semi-aberto: (Fig. 3.14 b) quando existe apenas um disco onde se fixam as pás do rotor;
- Aberto: quando não existe essa coroa circular anterior. Usa-se para líquidos contendo pastas, lamas, areia, esgotos sanitários e para outras condições que serão estudadas (Fig. 3.14 c).

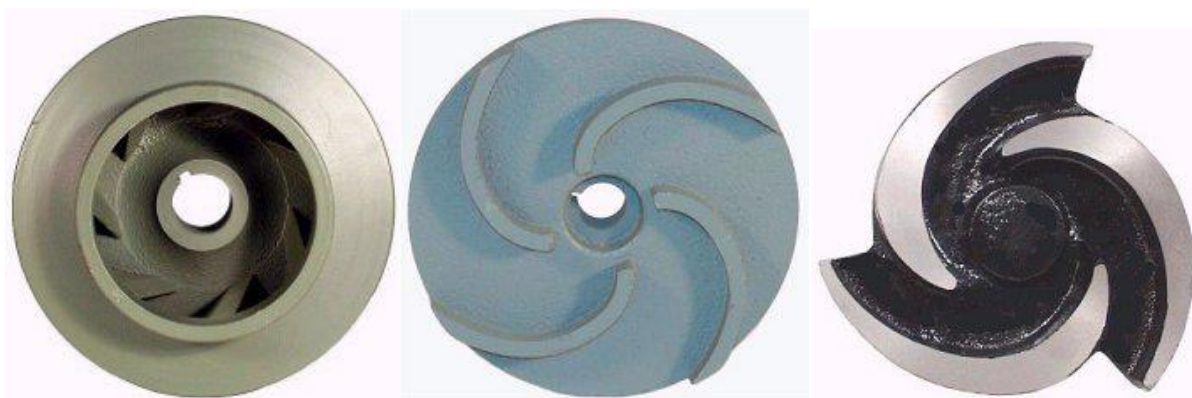


Figura 14 – Rotores de turbo- bombas fechado, semiaberto e aberto, respectivamente. (Fonte: BRASIL, 2013)

Dependendo do tipo de bomba o difusor pode ser:

- de tubo reto troncônico, nas bombas axiais;
- de caixa com forma de *caracol* ou *voluta*, nos demais tipos de bomba, chamado neste caso simplesmente de *coletor* ou *caracol*.

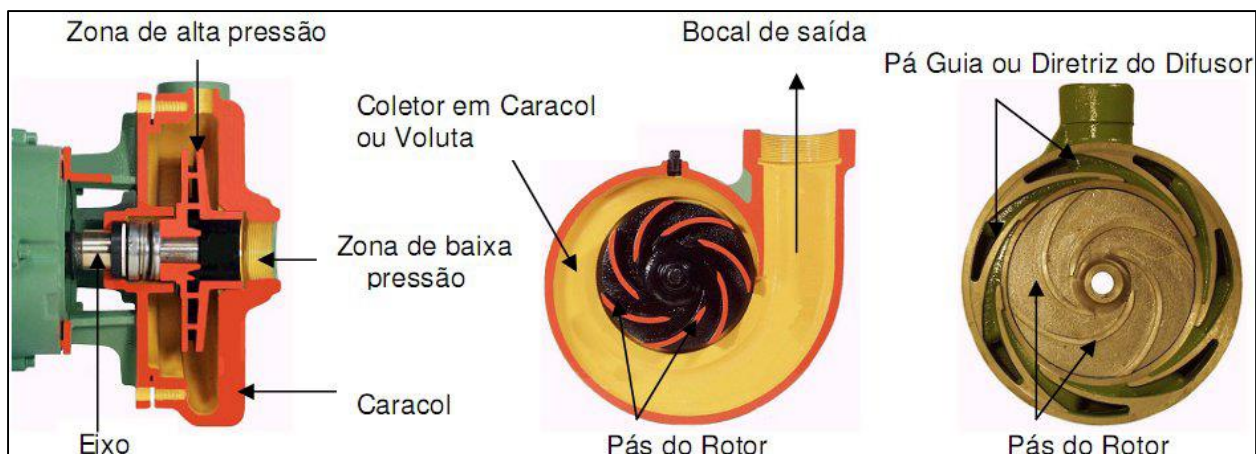


Figura 15 – Bomba centrífuga em caixa, em caracol ou voluta.
(Fonte: BRASIL, 2013)

A Figura 15 apresenta da esquerda para a direita, vista lateral do caracol e rotor em corte, vista frontal do caracol e rotor e Caixa espiral de descarga centralizada com difusor.

Entre a saída do rotor e o caracol, em certas bombas, colocam-se palhetas devidamente orientadas, as pás guias (Figura 16), para que o líquido que sai do rotor seja conduzido ao coletor com velocidade, direção e sentido tais que a transformação da energia cinética em energia potencial de pressão se processe com um mínimo de perdas por atrito ou turbulências. Muitos fabricantes europeus usam o difusor de pás, enquanto os americanos, em geral, preferem o difusor-coletor em caracol, sem pás.

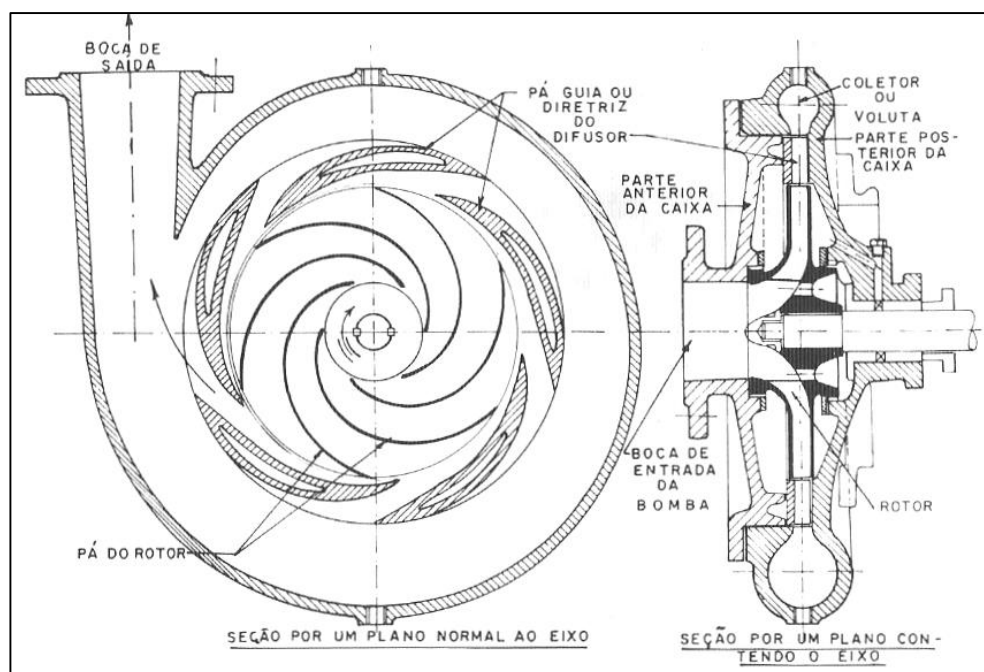


Figura 16 – Bomba centrífuga com pás guias.
(Fonte: BRASIL, 2013)

6.4.4 Classificação das Turbobombas

6.4.5 Classificação segundo a trajetória do fluido líquido no rotor

6.4.5.1 Bomba centrífuga pura ou radial

A movimentação do fluido ocorre do centro para a periferia do rotor, com sentido perpendicular (normal) ao eixo de rotação.

Ao iniciar o processo de rotação, o rotor cede energia cinética à massa fluídica, deslocando-a para a periferia do rotor pela força centrífuga.

Obs.: Em relação ao transporte de água, este tipo de bomba é o mais empregado em escala mundial.

Antes do funcionamento, é necessário que a carcaça da bomba e a tubulação de sucção, estejam totalmente preenchidas com o fluido a ser bombeado, ou seja, “escorvadas”.

Ao iniciar-se o processo de rotação, o rotor cede energia cinética à massa do fluido, deslocando suas partículas para a extremidade periférica do rotor. Isto ocorre pela ação da força centrífuga.

Com isso, inicia-se a formação das duas zonas de pressão (baixa e alta) necessárias para desenvolver o processo:

(A) Com o deslocamento da massa inicial do fluido do centro do rotor para sua extremidade, formar-se-á um vazio (vácuo), sendo este, o ponto de menor pressão da bomba. Obviamente, novas e sucessivas massas do fluido provenientes da captação ocuparão este espaço, pela ação da pressão atmosférica ou outra força qualquer;

(B) Paralelamente, a massa do fluido que é arrastada para a periferia do rotor, agora comprimida entre as pás e as faces internas do mesmo, recebe uma crescente energia de pressão, derivada da energia potencial e da energia cinética, anteriormente fornecidas ao sistema. O crescente alargamento da área de escoamento (Teorema de Bernoulli), assim como as características construtivas do interior da carcaça da bomba (voluta ou difusores), ocasionam a alta pressão na descarga da bomba, elevando o fluido a altura desejada.

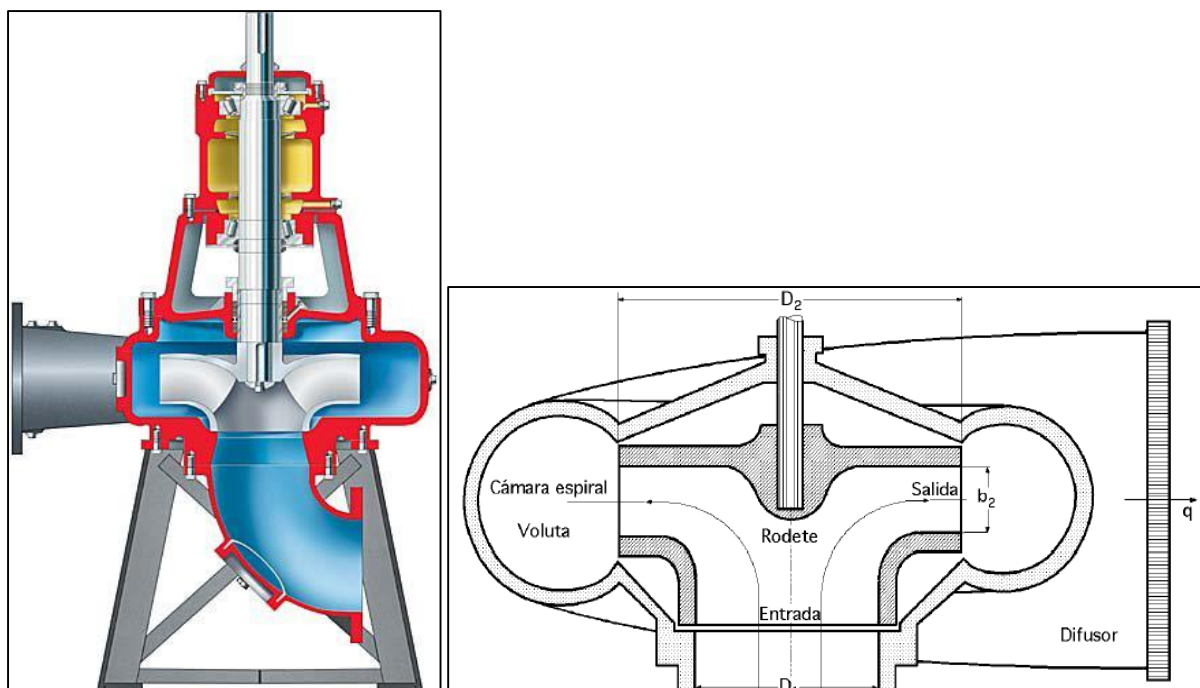


Figura 17 – Bomba centrífuga com rotor radial.
(Fonte: BRASIL, 2013)

Estas bombas, ditas do tipo radial, pela sua simplicidade, são fabricadas em série, sendo generalizada sua construção e estendida sua utilização à grande maioria das instalações comuns de água limpa, descargas de 5 a 500l/s e até mais, e para pequenas, médias e grandes alturas de elevação. Notemos que essas indicações são vagas e algo imprecisas, e que a escolha do tipo de rotor dependerá da noção de “velocidade específica” que será estudada adiante. Quando se trata de descargas grandes e pequenas alturas de elevação, o rendimento das bombas radiais torna-se baixo, e o seu custo se eleva em virtude das dimensões que assumem suas peças, tomando-se pouco conveniente empregá-las.

As bombas centrífugas são usadas no bombeamento de água limpa, água do mar, condensados, óleos, lixívias, para pressões de até 16 kgf/cm² e temperaturas de até 140 °C.

6.4.5.2 Bomba de fluxo misto ou bomba diagonal

Constitui um caso intermediário entre as bombas radiais e axiais, tanto no que diz respeito à trajetória, como, inclusive, no campo de emprego. Assim, sua trajetória se faz numa diagonal e seu campo de emprego caracteriza-se pelo recalque de médias vazões em médias alturas.

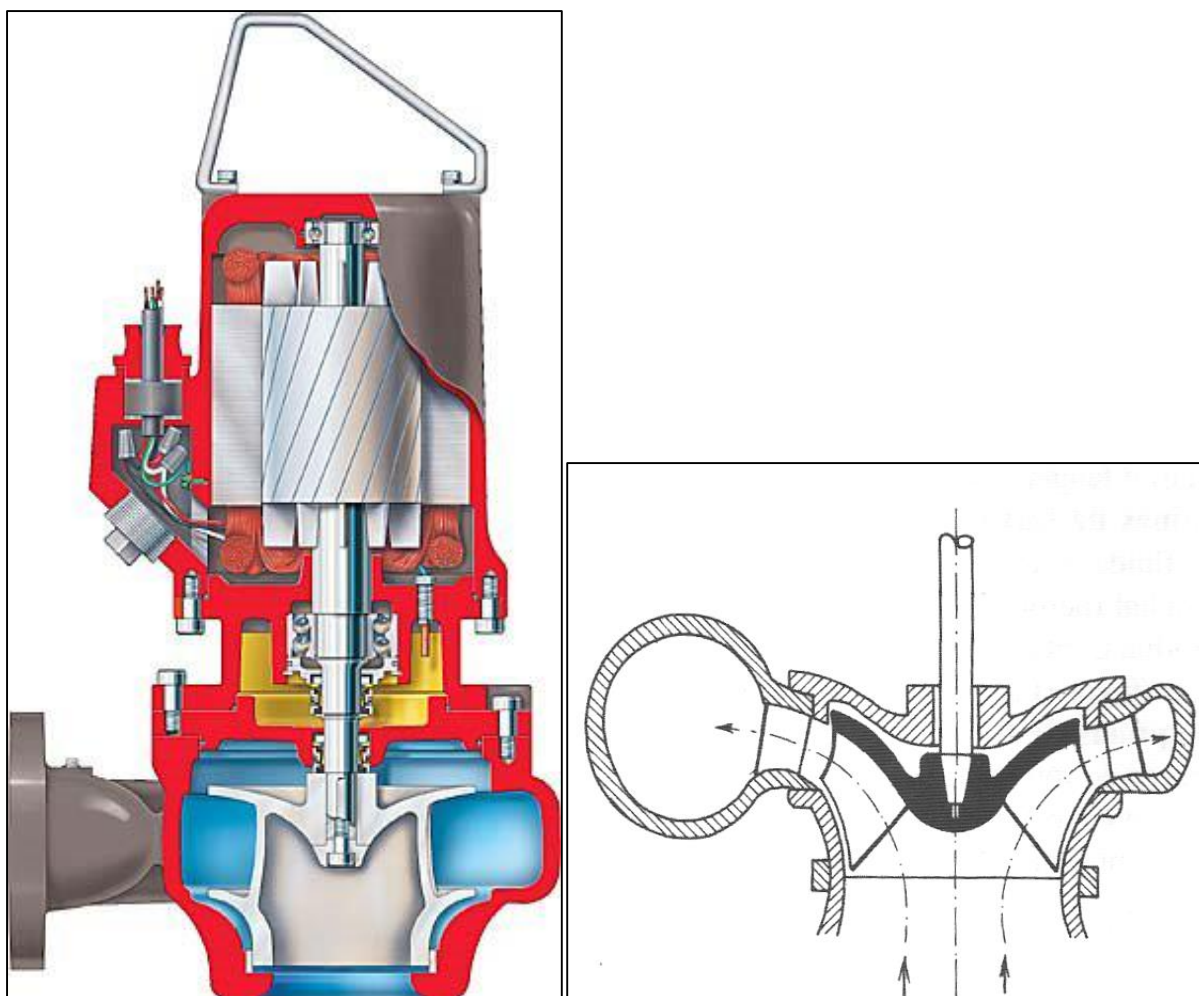


Figura 18 – Bomba centrífuga com rotor diagonal.
(Fonte: BRASIL, 2013)

6.4.5.3 Bomba axial ou propulsora

Nestas bombas, as trajetórias das partículas líquidas, pela configuração que assumem as pás do rotor e as pás guias, começam paralelamente ao eixo e se transformam em hélices cilíndricas. Forma-se um hélice de vórtice forçado, pois, ao escoamento axial, superpõe-se um vórtice forçado pelo movimento das pás. Não são propriamente bombas centrífugas, pois a força centrífuga decorrente da rotação das pás não é a responsável pelo aumento da energia da pressão. São estudadas e projetadas segundo a *teoria da sustentação das asas* e da *propulsão das hélices* ou ainda segundo a *teoria do vórtice forçado*.

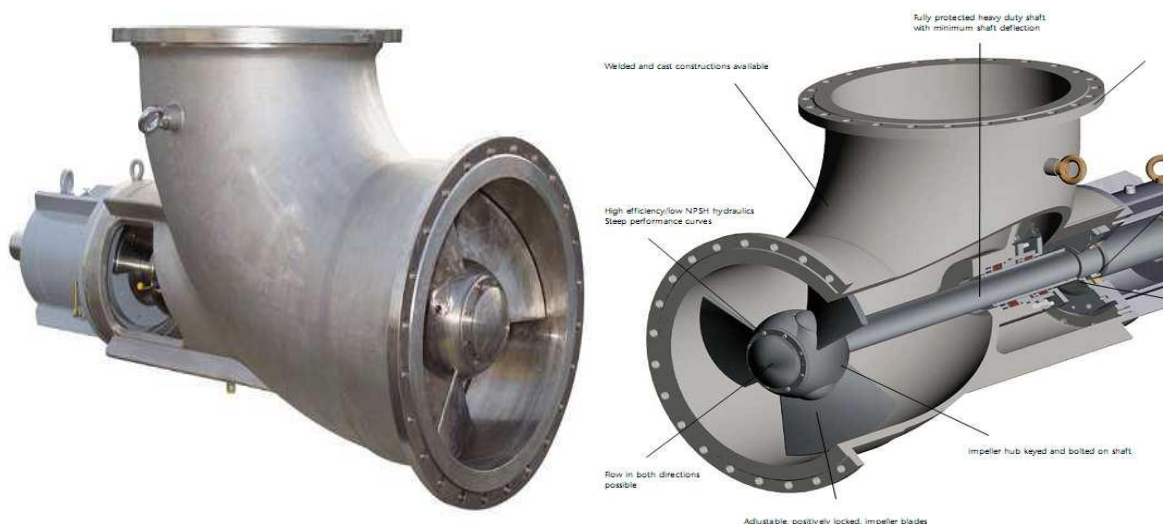


Figura 19 – Bomba centrífuga com rotor axial.
(Fonte: BRASIL, 2013)

Estas bombas axiais são empregadas para realizar grandes descargas (vazões volumétricas de até várias dezenas de metros cúbicos por segundo – m^3/s) e alturas de elevação de até mais de 40 m.

Possui ainda difusor de pás guias, isto é, coletor tronco-cônico com pás guias. O eixo em geral é vertical, e por isso são conhecidas como *bombas verticais de coluna*, porém existem modelos com o eixo inclinado e até mesmo horizontal.

Constroem-se bombas axiais com pás inclináveis (passo variável), podendo-se, por meio de um mecanismo localizado no interior da ogiva e comandado automaticamente por servomecanismos, dar às pás uma inclinação adequada a cada descarga desejada, para que o rendimento sofra pequena variação.

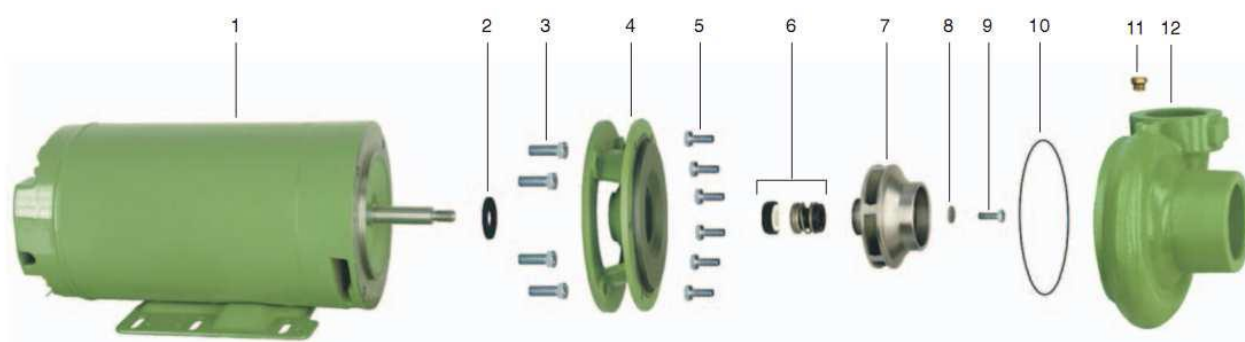
6.4.6 Classificação segundo o número de rotores empregados

6.4.6.1 Bombas de simples estágio

Nesta bomba existe apenas um único rotor e, portanto, o fornecimento da energia ao líquido é realizado em um único estágio (constituído por um único rotor e um difusor, conforme apresentado na Fig. 20). Teoricamente seria possível se projetar uma bomba com um estágio para quaisquer condições propostas.



Figura 20 – Bomba hidráulica de estágio simples
(Fonte: BRASIL, 2013)



CÓDIGOS DOS COMPONENTES DOS PRODUTOS						
Item	Descrição	Quantidade		BCV		
1	Motor elétrico IP-21, 2 Pólos, 60 Hz	1		1,5 cv	2 cv	3 cv
2	Anel de respingo	1	53-0		53-0	53-0
3	Parafuso S.NC. 3/8" x 1"	4	3-6		3-6	3-6
4	Intermediário	1	667-1		667-1	667-1
5	Parafuso S.NC. 1/4" x 5/8"	6	821-7		821-7	821-7
6	Selo mecânico 5/8" IP06 BUNA	1	595-2		595-2	595-2
7	Rotor (94 mm)	1	2267-6		-	-
7	Rotor (98 mm)	1	2490-9		-	-
7	Rotor (102 mm)	1	-		868-0	-
7	Rotor (106 mm)	1	-		1830-2	-
7	Rotor (110 mm)	1	-		690-7	690-7
7	Rotor (114 mm)	1	-		-	668-5
* 8	Arruela lisa 1/4"	1	420-0		420-0	420-0
* 9	Parafuso S.NF. 1/4" x 3/4"	1	1179-4		1179-4	1179-4
10	O-ring 2049	1	769-9		769-9	769-9
11	Bujão de vedação 1/4" GAS	1	2346-2		2346-2	2346-2
12	Caracol	1	668-3		668-3	668-3
**	Mancal MG JPL JJR	1	2486-7		2486-7	2486-7

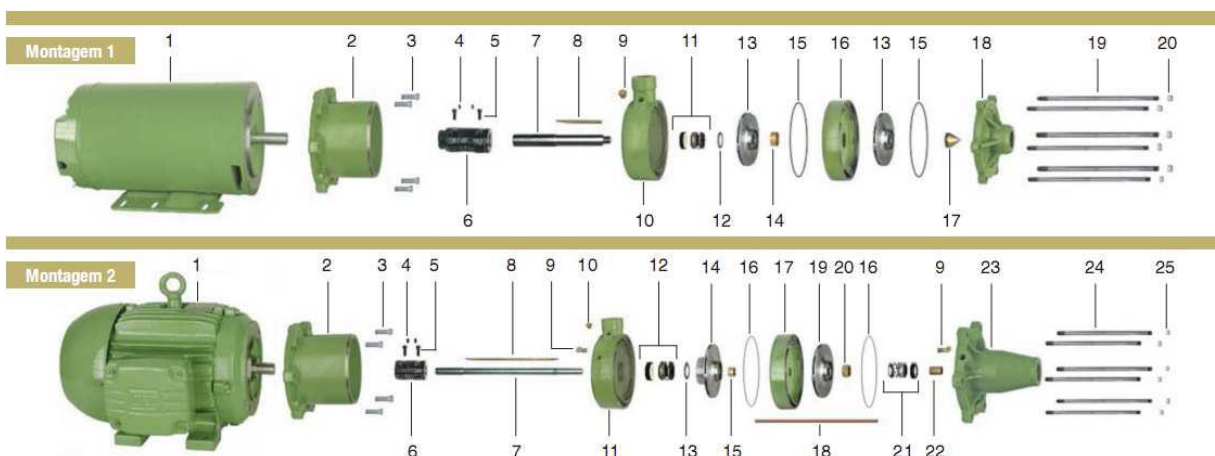
Figura 21 – Vista explodida da bomba de simples estágio com seus respectivos componentes
(Fonte: BRASIL, 2013)

6.4.6.2 Bomba de multiestágios ou estágios múltiplos

Quando a altura de elevação é grande, faz-se o líquido passar sucessivamente por dois ou mais rotores fixados ao mesmo eixo e colocados em uma caixa cuja forma permite esse escoamento.



Figura 22 – Bombas centrífugas de múltiplos estágios.
(Fonte: BRASIL, 2013)



CÓDIGOS DOS COMPONENTES DOS PRODUTOS																
MONTAGEM 1				MONTAGEM 2												
Item	Descrição	Quant.	ME-1207	ME-1210	ME-1315	Item	Descrição	Quant.	ME-1420	ME-1420 V	ME-1530 V	ME-1630	ME-1630 V	ME-1640 V	ME-1840	ME-1950
1	Motor elétrico 2 Pólos, 60 Hz	1	2937-3	2937-3	2937-3	1	Motor elétrico 2 Pólos, 60 Hz	1	2937-3	2937-3	2937-3	2937-3	2937-3	1042-0	1042-0	1042-0
*2	Intermediário	1	2937-3	2937-3	2937-3	*2	Intermediário	1	2937-3	2937-3	2937-3	2937-3	2937-3	1042-0	1042-0	1042-0
3	Parafuso S.NC, 3/8" x 1 1/4"	4	178-8	178-8	178-8	3	Parafuso S.NC, 3/8" x 1 1/4"	4	178-8	178-8	178-8	178-8	178-8	178-8	178-8	178-8
4	Parafuso TOC.NC, 5/16" x 3/8"	2	423-6	423-6	423-6	4	Parafuso TOC.NC, 5/16" x 3/8"	2	423-6	423-6	423-6	423-6	423-6	423-6	423-6	423-6
5	Parafuso TOC.NC, 5/16" x 7/8"	2	733-0	733-0	733-0	5	Parafuso TOC.NC, 5/16" x 7/8"	2	733-0	733-0	733-0	733-0	733-0	733-0	733-0	733-0
*6	Acoplamento	1	2754-6	2754-6	2754-6	*6	Acoplamento	1	2754-6	2754-6	2754-6	2754-6	2754-6	1508-8	1508-8	1508-8
7	Eixo	1	2758-3	2758-3	2758-5	7	Eixo	1	1553-2	1553-2	1514-3	1555-6	1555-6	1555-8	1555-8	1557-0
8	Chaveta	1	1559-3	1559-3	1560-0	8	Chaveta	1	1561-1	1561-1	1591-3	378-5	378-5	378-5	378-5	1565-9
9	Bucla de vedação 1/4" GAS	1	2246-2	2246-2	2246-2	9	Cotovelo macho	2	-	-	-	-	-	-	-	9-7
10	Corpo de saída	1	1131-9	1131-9	1131-9	10	Bucla de vedação 1/4" GAS	1	2246-2	2246-2	2246-2	2246-2	2246-2	2246-2	2246-2	2246-2
11	Selo mecânico 3/4" T21 BUNA	1	321-9	321-9	321-9	11	Corpo de saída	1	1131-9	1131-9	1131-9	1131-9	1131-9	1131-9	1129-0	1129-0
12	Arvula de encaixe do rotor	1	1499-0	1499-0	1499-0	12	Selo mecânico 3/4" T21 BUNA	1	321-9	321-9	321-9	321-9	321-9	321-9	321-9	321-9
13	Rotor AL	Est.	591-7	591-5	591-5	13	Rotor AL CC	1	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0
14	Rotor BR	Est.	720-4	733-6	732-8	14	Rotor AL CC	1	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0	1499-0
15	Bucha de distância	Est.-1	1872-7	1872-7	1872-7	15	Rotor BR	1	-	-	-	-	-	-	807-9	2885-0
16	O-ring 140 x 1,78 mm EPDM	Est.	426-1	426-1	426-1	16	Bucha de distância	Est.-1	1872-7	1872-7	1872-7	1872-7	1872-7	1872-7	1872-7	1872-7
17	Divisão	Est.-1	727-4	727-4	727-4	17	O-ring 140 x 1,78 mm EPDM	Est.	426-1	426-1	426-1	426-1	426-1	426-1	426-1	426-1
18	Contracapa do rotor	1	702-0	702-0	702-0	18	Divisão	Est.-1	727-4	727-4	727-4	727-4	727-4	727-4	727-4	727-4
19	Lateral de entrada	1	753-5	753-5	753-5	19	Tubo de cobre	1	-	-	-	-	-	-	976-3	977-5
20	Haste 3/8"	6	767-5	767-5	1545-3	**19	Rotor AL	** Est.	591-3	-	-	591-7	-	-	1876-8	591-5
21	Haste 3/8"	6	849-7	849-7	767-5	**19	Rotor BR	** Est.	751-6	-	-	750-4	-	-	1876-4	752-8
22	Porca NCZ, 3/8"	6	2406-5	2406-5	2406-5	**19	Rotor AL 91 mm	1	-	31681-7	31681-7	-	31681-7	-	-	-
23	Mancal MG 100FC149-5/B	1	1137-0	1137-0	1137-0	20	Rotor AL 107 mm	*** Est.-1	-	31680-5	31680-5	-	31680-5	31680-5	-	-
24	Diâmetro do rotor (mm)		104	107	107	21	Rotor BR 91 mm	1	-	31679-8	31679-8	-	31679-8	-	-	-
						22	Rotor BR 107 mm	*** Est.-1	-	31682-9	31682-9	-	31682-9	31682-9	-	-
						23	Contracapa do rotor	1	1524-6	1524-6	1524-6	1524-6	1524-6	1524-6	1524-6	1524-6
						24	Selo mecânico 5/8" T21 BUNA	1	302-5	302-5	302-5	302-5	302-5	302-5	302-5	302-5
						25	Bucha sinterizada	1	281-9	531-9	281-9	281-9	531-9	281-9	281-9	531-9
						26	Lateral de entrada	1	1054-6	1054-6	1054-6	1054-6	1054-6	1054-6	1050-0	1050-0
						27	Haste 3/8"	6	1546-5	1546-5	1546-5	1546-5	1546-5	1546-5	1546-5	1542-0
						28	Haste 3/8"	6	1545-3	1545-3	1545-3	1545-3	1547-7	1547-7	1547-7	1543-0
						29	Porca NCZ, 3/8"	6	2406-5	2406-5	2406-5	2406-5	2406-5	2406-5	2406-5	2406-5
						30	Mancal MG 100FC149	1	1137-0	1137-0	1137-0	1137-0	1137-0	1138-1	1138-1	1138-1
						31	Diâmetro do rotor (mm)		105	91 / 107	91 / 107	104	91 / 107	107	101	107

Figura 23 – Vista explodida de bomba centrífuga multiestágios, com seus respectivos componentes.
(Fonte: BRASIL, 2013)

A passagem do líquido em cada rotor e difusor constitui um *estágio* na operação de bombeamento. Se o difusor de pás guias está entre dois rotores consecutivos, denomina-se então *distribuidor da bomba*. As pás do distribuidor são fundidas ou fixadas à carcaça ou ainda podem ser adaptáveis à carcaça. O eixo pode ser horizontal ou vertical.

6.4.7 Operação de bombas centrífugas

A operação de uma bomba centrífuga depende do tipo de bomba e do serviço para o qual ela foi selecionada, bem como do sistema no qual está instalada. Deve-se observar cuidadosamente os dados e procedimentos definidos no manual de instalação, operação e manutenção fornecido pelo fabricante assim como nos manuais de operação da unidade. Serão apresentados aqui passos básicos para uma visão global da operação de bombas centrífugas.

A operação compõe-se das fases de partida, acompanhamento e parada.

Deve-se efetuar uma inspeção preliminar da bomba, observando:

- limpeza;
- segurança;
- sentido de rotação do acionador;
- sistema de lubrificação;
- sistemas auxiliares (água de refrigeração, líquido de selagem, vapor de aquecimento, etc.);
- linhas de sucção e descarga e seus alinhamentos; e
- escorva da sucção.

A partida pode ser manual ou automática. Para partida manual, é necessário observar os principais passos:

- fechar drenos;
- fechar válvula de descarga – lembrar que bombas axiais partem com a válvula de descarga aberta;
- abrir válvula de recirculação, se necessário;
- abrir válvula de sucção;
- partir o acionador;
- abrir válvula de descarga vagarosamente após a bomba alcançar rotação normal;
- fechar válvula de recirculação se necessário; e
- observar operação inicial do conjunto: vazamentos, temperatura, ruído, vibração, aquecimento ou qualquer comportamento anormal, etc.

No caso de partida automática tem-se apenas o passo partir, de forma remota. Porém, é necessário colocar a bomba em condição de partida automática e realizar os passos não-

automatizados, pois é importante observar que, na opção automático, as válvulas sempre ficarão abertas, a menos que se tenham acionadores com comando remoto.

O acompanhamento visa detectar anormalidades e evitar que uma condição operacional inadequada se torne uma falha mecânica, ou uma falha mecânica se agrave a ponto de danificar severamente o equipamento e/ou causar acidentes. Dá-se pela observação e intervenção do técnico de operação, com uso de instrumentos portáteis de monitoramento (como medidores de vibração, medidores de temperatura, avaliadores de ruído e detectores de vazamentos) e de instrumentos residentes de monitoramento e proteção (sensores instalados no equipamento e cabos que transmitem os sinais até a estação de controle). As determinações de uso desses métodos são em função da importância do equipamento e da política de operação e de automação da empresa.

Os principais problemas que constituem falhas mecânicas são:

- **Vazamentos:** Produto, lubrificante e água de refrigeração.
- **Vibração:** Cavitação, carga excessiva, carga muito baixa, desbalanceamento, desalinhamento, folgas inadequadas, etc.
- **Erosão:** Cavitação, sólidos em suspensão.
- **Ruído:** Danificação dos mancais, atrito entre as partes móveis, cavitação.
- **Aquecimento excessivo:** Falha na lubrificação, excesso de lubrificante nos mancais, falha na refrigeração, recirculação excessiva, bloqueio da descarga, etc.
- **Perda de eficiência:** Recirculação interna devido a desgaste dos anéis de desgaste, vazamento excessivo, etc.

A parada também pode ser manual ou automática. Na parada manual, é necessário observar os passos da partida na seqüência inversa. Na parada automática, é preciso apenas parar pelo sistema de comando remoto.

6.4.8 Cavitação/NPSH

Uma definição simples de cavitação e NPSH seria: uma intensa formação de bolhas de vapor na zona de baixa pressão da bomba e posterior colapso destas bolhas na região de alta pressão e NPSH é a pressão mínima em termos absolutos, em metros de coluna de água, acima da pressão de vapor do produto, a fim de evitar a formação destas bolhas de vapor.

6.4.8.1 Pressão de vapor

Pressão de vapor de um líquido a uma dada temperatura é aquela à qual o líquido coexiste em sua fase líquida e vapor.

Numa mesma temperatura, quando tivermos uma pressão maior que a pressão de vapor, haverá somente a fase líquida e quando tivermos uma pressão menor que a pressão de vapor, haverá somente a fase vapor.

A pressão de vapor de um líquido cresce com o aumento da temperatura, assim, caso a temperatura seja elevada até um ponto que a pressão de vapor iguale, por exemplo, a pressão atmosférica, resultará na evaporação do líquido, ocorrendo o fenômeno da ebulição.

6.4.8.2 O fenômeno da cavitação

No deslocamento de pistões, nos "Venturis", no deslocamento de superfícies constituídas por pás, como sucede em bombas centrífugas, ocorrem inevitavelmente rarefações no líquido, isto é, pressões reduzidas devido a própria natureza do escoamento ou ao movimento impresso pelas peças móveis ao fluido.

Se a pressão absoluta baixar até atingir a **pressão de vapor** ou **tensão de vapor** do líquido na temperatura em que este se encontra, inicia-se um processo de vaporização do mesmo. Inicialmente, nas regiões mais rarefeitas, formam-se pequenas bolsas, bolhas ou cavidades (daí o nome **cavitação**), no interior dos quais o líquido se vaporiza. Em seguida, conduzido pelo fluxo líquido provocado pelo órgão propulsor e com grande velocidade, atingem regiões de elevada pressão, onde se processa o seu colapso, com a condensação do vapor e o retorno ao estado líquido. As bolhas que contém vapor do líquido parecem originar-se em pequenas cavidades nas paredes do material ou em torno de pequenas impurezas contidas no líquido, em geral próximas as superfícies, chamadas de **núcleos de vaporização ou de cavitação**, cuja natureza constitui objeto de pesquisas interessantes e importantes.

Portanto, quando a pressão reinante no líquido se torna maior que a pressão interna da bolha de vapor, as dimensões da mesma se reduzem bruscamente, ocorrendo o seu colapso e provocando o deslocamento do líquido circundante para seu interior, gerando assim uma pressão de inércia considerável. As partículas formadas pela condensação se chocam muito rapidamente umas de encontro a outras e de encontro à superfície que anteponha o seu

deslocamento. As superfícies metálicas onde se chocam as diminutas partículas resultantes da condensação são submetidas a uma atuação de forças complexas, oriundas da energia liberada dessas partículas, que produzem percussões, desagregando elementos de material de menor coesão e formam pequenos orifícios, que, com o prosseguimento do fenômeno, dão à superfície um aspecto esponjoso, rendilhado, corroído. É a **erosão por cavitação**.

O desgaste pode assumir proporções tais que pedaços de material podem soltar-se das peças. Cada bolha de vapor assim formada, tem um ciclo entre crescimento e colapso, da ordem de poucos milésimos de segundo e induz a altíssimas pressões que atingem concentradamente a zona afetada. Para se ter ideia desse processo, alguns pesquisadores mencionam que este ciclo é repetido numa frequência que pode atingir a ordem de 25.000 bolhas por segundo e que a pressão provavelmente transmitida às superfícies metálicas adjacentes ao centro de colapso das bolhas pode atingir a pressão de 1000 atm.

Um outro aspecto que merece atenção é que, tendo em vista o caráter cíclico do fenômeno, as ações mecânicas repetidas na mesma região metálica ocasionam um aumento local de temperatura de até 800 C.

6.4.8.3 Consequências do fenômeno da cavitação

Os efeitos da cavitação dependem do tempo de duração, intensidade da cavitação, propriedade do líquido e resistência do material à erosão por cavitação, ou seja, a cavitação causa barulho, vibração, alteração das curvas características e danificação ou "pitting" do material. O **barulho e a vibração** são provocados principalmente pela instabilidade gerada pelo colapso das bolhas.

A **alteração nas curvas características**, e conseqüente alteração no desempenho da bomba é devida à diferença de volume específico entre o líquido e o vapor, bem como a turbulência gerada pelo fenômeno. Esta alteração nas curvas é mais drástica no caso de bombas centrífugas, pois neste caso, tendo em vista que o canal de passagem do líquido é restrito, a presença de bolhas influencia consideravelmente o desempenho do equipamento.

A **danificação do material** em uma bomba centrífuga geralmente ocorre no rotor, podendo também ocorrer nos corpos ou difusores.

Geralmente, os pontos atacados no rotor estão situados na parte frontal da pá, caso o ponto de trabalho esteja à esquerda da vazão correspondente ao ponto de melhor rendimento ou na parte traseira, caso esteja situado à direita.

A cavitação poderá ocorrer em maior ou menor intensidade. Quando ocorrer cavitação de pequena intensidade, seus efeitos serão muitas vezes imperceptíveis, ou seja, não se notarão alteração nas características de performance da bomba, nem ruído e vibrações.

Com o aumento desta intensidade, estes efeitos passarão a ser perceptíveis através de ruído característico (o ruído se parece com o crepitar de lenha na fogueira; um martelamento com frequência elevada ou um misturador de concreto em alta velocidade).

Deve-se verificar que a erosão por cavitação não se verifica no lugar onde as bolhas se formam, mas sim no local onde implodem.

Na construção de máquinas hidráulicas, há uma tendência para a escolha de rotações elevadas de funcionamento, com a finalidade de se reduzir as dimensões do equipamento, e, portanto, o custo; porém em tais condições aumenta-se o risco de cavitação.

A Figura 24 ilustra um rotor que sofreu as consequências da erosão por cavitação.



Figura 24 – Exemplo de rotor que sofreu o processo da cavitação
(Fonte: KSB,1991)

7 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

7.1 Tipos de monitoração

De acordo com (PINTO e XAVIER, 2012), a manutenção preditiva é aquela que indica a necessidade de intervenção com base no estado do equipamento.

A avaliação do estado do equipamento se dá através de medição, monitoração ou acompanhamento de parâmetros.

Esse monitoramento pode ser feito de três formas:

- Acompanhamento ou monitoração subjetiva.
- Acompanhamento ou monitoração objetiva.
- Monitoração contínua.

7.2 Monitoração subjetiva

Há variáveis dos equipamentos que são acompanhadas e/ou monitoradas pelas equipes de Manutenção há muito tempo, desde o instante em que o equipamento começa a operar, quais sejam estas variáveis: Temperatura, Vibração, Análise do Óleo, Ruído, etc.

Uma prática bastante corriqueira no setor industrial é ver técnicos, supervisores, e engenheiros de manutenção “auscultando” os equipamentos e as instalações industriais via capacete, caneta esferográfica ou através de telescópio, ou até colocando a palma da mão sob uma caixa de redução e dizer em seguida: “O equipamento ainda está operacional !”.

Os profissionais responsáveis pela lubrificação dos equipamentos verificam com os próprios dedos a viscosidade do óleo, comparando a sua textura com o óleo e portanto através do tato dizem se o mesmo ainda é útil ou não.

A existência de folga entre peças é perceptível através do tato e da audição (ruídos).

Todos estes procedimentos acima descritos fazem parte da monitoração subjetiva do equipamento, sendo que este tipo de monitoramento depende tão somente da sensibilidade e da

experiência dos responsáveis pela manutenção dos equipamentos o que muitas das vezes não pode ser considerado como algo padronizado e confiável de uma maneira geral.

7.3 Monitoração objetiva

Este tipo de monitoramento é feito através de um acompanhamento efetivo dos equipamentos através de instrumentos de medição confiáveis, dedicados e específicos.

Esta monitoração é tida como Objetiva porque:

- Fornece valores de medição dos parâmetros acompanhados pelos instrumentos, e;
- Se o procedimento a ser adotado for o mesmo, os valores obtidos serão independentes dos operadores dos instrumentos.

É necessário que determinados cuidados e medidas sejam tomadas antes de iniciar-se o acompanhamento, a fim de que haja total sucesso na monitoração objetiva:

- Os operadores dos instrumentos recebam treinamentos adequados e específicos para cada tipo de instrumento a ser manuseado;
- Haja uma calibração efetiva e periódica dos instrumentos em locais adequados com temperatura e nível de ruídos controlados e seguindo-se as normas técnicas vigentes;
- Que haja também pessoas treinadas e qualificadas para analisar, interpretar e discutir os resultados disponibilizados nos relatórios finais emitidos pelos instrumentos.

Há um fator importantíssimo que não se pode deixar de levantar, que é a confiança que os gerentes-executivos das empresas tem que ter uma extrema confiança no seu pessoal de manutenção para implementar tais técnicas, pois as mesmas são bastante onerosas.

7.4 Monitoração contínua

É uma espécie de acompanhamento contínuo, que no início foi adotado como em situações onde o defeito se desenvolvia rapidamente e em equipamento bastante úteis aos processos produtivos das indústrias e fábricas de um modo geral.

Portanto, este tipo de monitoração é tido como bastante protetivo aos equipamentos se realizada com dispositivos pré-programados que, em um momento inicial alarmam, avisam aos técnicos, e, em seguida, desarmam e/ou desligam o equipamento, após atingido o valor-limite, promovendo assim uma parada a fim de evitar maiores danos ao equipamento.

7.5 Principais técnicas preditivas

De acordo com (FILHO, 2010), a manutenção preditiva é aquela que indica as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação. Trata-se de um processo que prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado. Assim, atua-se com base na modificação de parâmetro de condição ou desempenho do equipamento, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. A manutenção preditiva pode ser comparada a uma inspeção sistemática para o acompanhamento das condições dos equipamentos.

Quando é necessária a intervenção da manutenção no equipamento, a empresa estará realizando uma manutenção corretiva planejada. Os objetivos da manutenção preditiva são:

- Determinar, antecipadamente, a necessidade de serviços de manutenção numa peça específica de um equipamento;
- Eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- Aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos;
- Reduzir o trabalho de emergência não planejado;
- Impedir o aumento dos danos;
- Aproveitar a vida útil total dos componentes e de um equipamento;
- Aumentar o grau de confiança no desempenho de um equipamento ou linha de produção;
- Determinar previamente as interrupções de fabricação para cuidar dos equipamentos que precisam de manutenção.

Por meio desses objetivos, pode-se deduzir que eles estão direcionados a uma finalidade maior e importante: redução de custos de manutenção e aumento da produtividade. Para ser

executada, a manutenção preditiva exige a utilização de aparelhos adequados, capazes de registrar vários fenômenos vibrações das máquinas; pressão; temperatura; desempenho; e aceleração.

Com base no conhecimento e análise dos fenômenos, torna-se possível indicar, com antecedência, eventuais defeitos ou falhas nas máquinas e equipamentos. A manutenção preditiva, após a análise do fenômeno, adota dois procedimentos para atacar os problemas detectados: estabelece um diagnóstico e efetua uma análise de tendências. No diagnóstico, detectada a irregularidade, o responsável terá o encargo de estabelecer, na medida do possível, um diagnóstico referente à origem e à gravidade do defeito constatado. Este diagnóstico deve ser feito antes de se programar o reparo.

Por sua vez, a análise da tendência da falha consiste em prever com antecedência a avaria ou a quebra, por meio de aparelhos que exercem vigilância constante predizendo a necessidade do reparo. Geralmente, adota-se vários métodos de investigação para poder intervir nas máquinas e equipamentos. Entre os vários métodos destacam-se os seguintes: estudo das vibrações; análise dos óleos; análise do estado das superfícies e análises estruturais de peças.

7.5.1 Análise de vibrações

7.5.1.1 Conceitos iniciais

Segundo (PINTO e XAVIER, 2012), o acompanhamento e a análise de vibração tornaram-se um dos mais importantes métodos de manutenção preditiva em vários tipos de indústrias. A maior ênfase de acompanhamento de vibração está concentrada nos equipamentos dinâmicos rotativos, para os quais tanto a metodologia de análise quanto os instrumentos e aparelhos, além de softwares de apoio e sistemas especialistas, se encontram num estágio bastante avançado.

Os parâmetros de vibração relacionados com máquinas rotativas são usualmente expressos em termos de *deslocamento*, *velocidade* e *aceleração*.

É um movimento oscilatório repetitivo em torno de um ponto de referência.

A vibração por ser um movimento pode ser medida em 3 grandezas que são:

- Deslocamento - μm (micrômetros)

- Velocidade - **mm/s**
- Aceleração - **mm/s² ou G's**

A **frequência** é o número de vezes com que um determinado evento se repete em um intervalo de tempo conhecido.

A frequência de vibração das máquinas usualmente é medida em:

- **Hz** – Ciclos por segundo
- **CPM** – Ciclos por minuto
- **ORDEM** – Múltiplos da rotação da máquina

O deslocamento (Eq.1), a velocidade (Eq.2) e a aceleração (Eq.3) são obtidos através das fórmulas:

- Deslocamento: $X = A \cdot \text{sen}(\omega t)$; (Eq.1)

- Velocidade: $v = A\omega \cdot \text{cos}(\omega t) = dx/dt$; (Eq.2)

- Aceleração: $a = -A\omega^2 \cdot \text{sen}(\omega t) = dv/dt$; (Eq.3)

Onde:

A = amplitude do vetor de zero a pico em mm (milímetros).

ω = velocidade angular dada em rad/s (radianos por segundo).

t = tempo em s (segundos).

Sabendo-se que $\omega = 2\pi f$ (Eq.5), onde f = frequência em ciclos/s, substituindo nas fórmulas de deslocamento, velocidade e aceleração, tem-se as seguintes conclusões físicas:

- ✓ A amplitude de deslocamento independe da frequência;
- ✓ A amplitude de velocidade depende diretamente da frequência; *
- ✓ A amplitude da velocidade aumentará com o quadrado da frequência. *

*Para um valor constante da amplitude de deslocamento:

$$\boxed{V = 2 \pi f A}$$

e

$$\boxed{a = (2 \pi f)^2 A}$$

Estas relações matemáticas são bastante úteis para a compreensão da melhor variável a ser acompanhada em relação à análise de vibração de qualquer equipamento rotativo.

7.5.1.2 A Transformada Rápida de Fourier ou Fourier's Fast Transformed – FFT

A Figura 25 nos mostra exatamente o que acontece quando uma máquina rotativa está em plena operação e os tipos de vibração existentes em cada ponto.

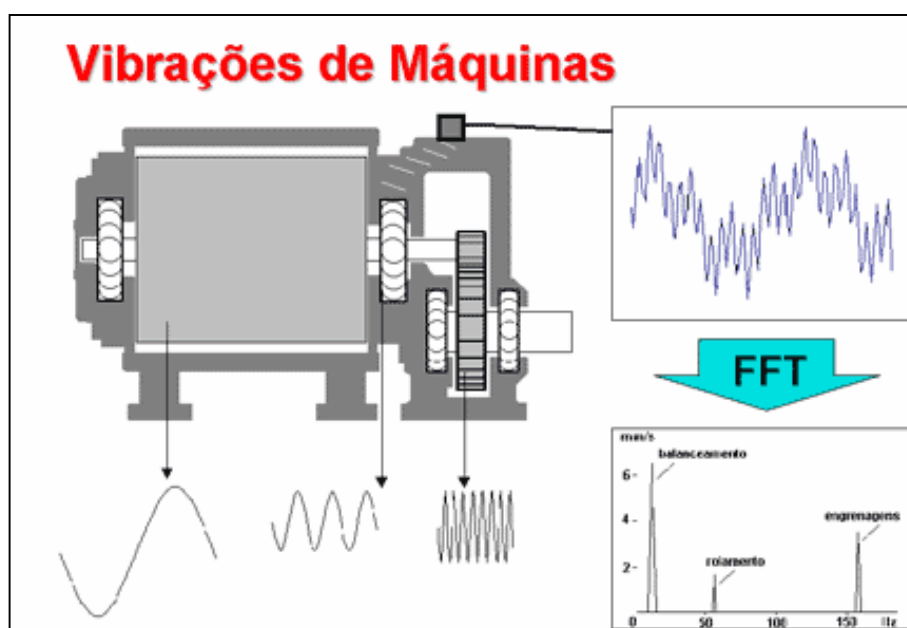


Figura 25 – Vibrações emitidas durante a operação de um máquina rotativa (Fonte: <http://manutencaosc.jlle1.com/?p=960>, 2017*)

De acordo com (ARCO-VERDE, 2015), uma determinada máquina rotativa vibra em várias frequências com suas respectivas amplitudes. Em virtude disto, a análise de uma série temporal seria bastante trabalhosa e suscetível a erros de interpretação. Desta forma, obter as frequências, e amplitudes, que compõem o sinal permitiria uma melhor análise de vibração.

A Transformada Rápida de Fourier ou Fourier's Fast Transformed – FFT (Figura 26), onde a mesma é técnica física-matemática que consiste em “transformar” o sinal da série temporal em um espectro de amplitude versus frequência. Essa técnica é também denominada de análise espectral sendo uma das técnicas mais importantes empregadas em análise de vibrações e diagnóstico de máquinas. A decomposição do sinal da série temporal em seus respectivos componentes senoidais resulta numa representação gráfica denominada de assinatura espectral, espectro de vibração, ou simplesmente espectro. Esta importante

ferramenta permite identificar os diversos sinais presentes na máquina. Desta forma, o sinal coletado é influenciado pelos diversos componentes internos e externos do equipamento, tais como a estrutura, equipamentos próximos, etc. Em virtude disto, a análise de vibração constitui-se numa poderosa ferramenta empregada na monitoração e diagnóstico de máquinas.

$$\mathfrak{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt = e^{-j\omega t} \Big|_{t=0} = 1 \angle 0 \quad -\infty < \omega < \infty$$

Figura 26 – Fórmula da Transformada Rápida de Fourier (FFT)
(Fonte: DECKMANN e POMÍLIO, 2010)

Sua maior vantagem está no fato de que as frequências de resposta da vibração pode m ser diretamente relacionadas a: frequências de excitação e seus múltiplos naturais, bandas laterais, sub-harmônicos e somas de diversas frequências. Assim, as frequências e amplitudes do espectro permitem identificar a causa da vibração, onde as amplitudes e suas bandas laterais estabelecem a severidade do problema. Logo, a figura a 27 demonstra as ondas senoidais emitidas no domínio do tempo, e, no domínio da frequência.

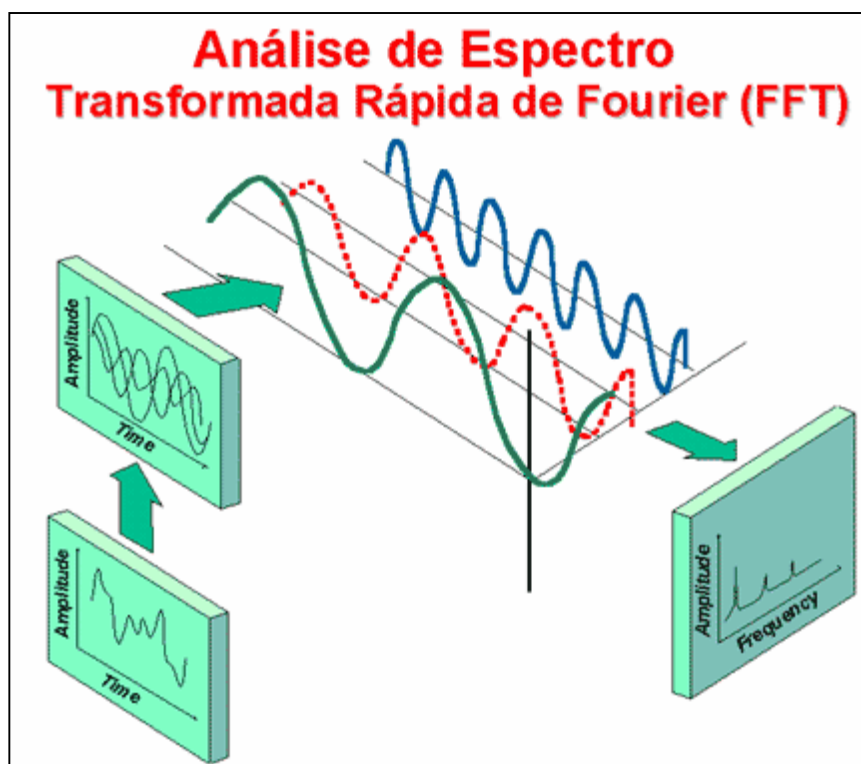


Figura 27 – Análise do Espectro através da FFT
(Fonte: <http://manutencaosc.jlle1.com/?p=960>, 2017*)

7.5.1.3 Instrumentos de medição

- **Sensor de vibração:**

O sensor de vibração da Figura 28 é colocado sob determinados pontos específicos da máquina rotativa por alguém especializado da Manutenção Industrial para coletar dados de vibração para posteriores análises de como está a operação do equipamento e dizer se o mesmo está operando dentro da faixa permitida ou não e, a partir daí, tomar decisões fundamentadas quanto à parada ou não da máquina.



Figura 28 – Sensor de vibração
(Fonte: Autor)

Na Figura 29 tem-se um Analisador de Vibração Portátil que recebe os dados do sensor, compila estes dados num software embarcado e plota um gráfico informando imediatamente se o equipamento está dentro da normalidade ou não.



Figura 29 – Analisador de Vibrações Portátil da Marca CSi
(Fonte: Autor)

7.5.1.4 Coleta dos dados

Durante a rotina de vistoria de área, os Técnicos de Operações (Figura 30), que são uns espécies de “donos dos equipamentos”, realizam medições diretas de vibração com uma caneta portátil mostrada na Figura 31, em pontos específicos na superfície dos equipamentos rotativos, tais como: misturadores, bombas centrífugas, compressores, etc., estes dados, dados por sua vez, são inseridos de forma manual num equipamento digital chamado portátil, estes dados são

descarregados num sistema, que migra para o setor de Manutenção da REMAN, caso seja verificado algum valor muito fora em relação à faixa normal de operação de determinado equipamento, algum Técnico de Manutenção portanto os equipamentos demonstrados nas Figuras 28 e 29, é designado para ir a campo verificar o que pode estar gerando tal desconformidade.



Figura 30 - Técnico de Operação coletando dados de vibração em bomba centrífuga
(Fonte: Autor)



Figura 31 – Caneta para coleta de dados (vibração e temperatura) da Marca SKF
(Fonte: Internet, 2017)

Em relação aos pontos específicos de coleta, pode-se ver na Figura 32, que os mesmos serão os mais próximos possíveis aos mancais e perpendiculares à superfície de medição. Os pontos de coleta não podem ser posicionados em tampas de proteção e superfícies de isolamento acústico e/ou térmico, pois as mesmas falseariam as leituras

Os referidos pontos de coleta deverão ser identificados por um código composto por três (3) campos, sejam eles:

- 1º Campo: número do ponto de coleta (1,2,3, ...)
- 2º Campo: direção da leitura (H, V, X ou R).
- 3º Campos: parâmetro de coleta (V, A, E).

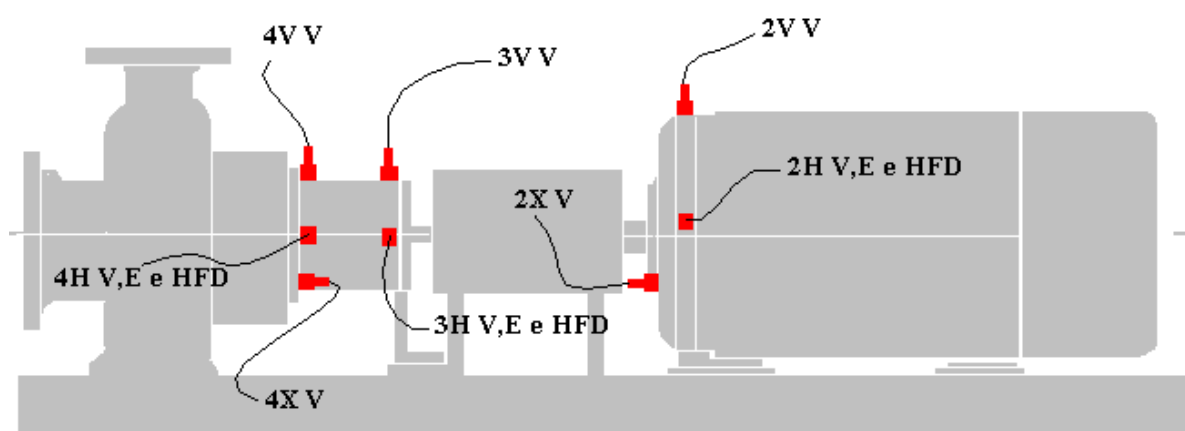


Figura 32 – Pontos de coleta de dados de vibração em bombas centrífugas horizontais
(FONTE: ARCO-VERDE, 2015, P.27)

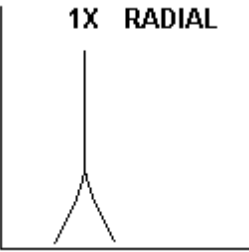
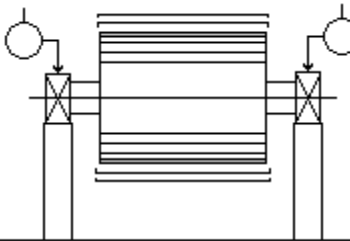
7.5.1.5 Problemas mais comuns encontrados


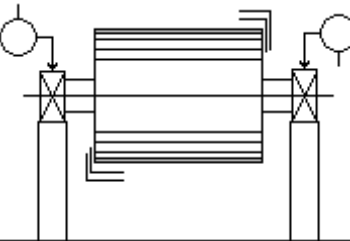
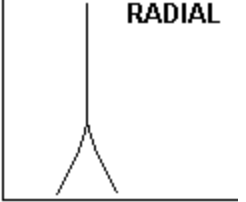
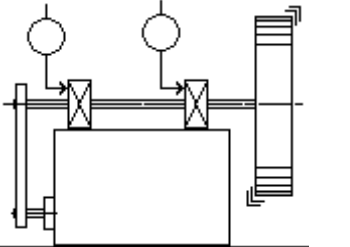
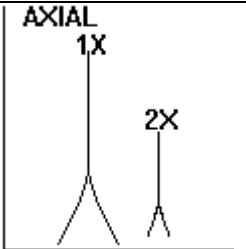
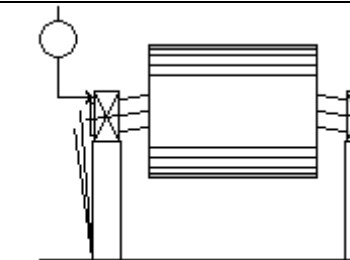
Os mais comumente encontrados são:

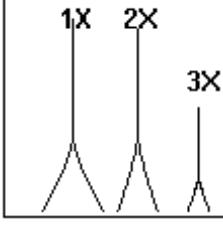
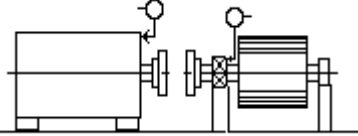
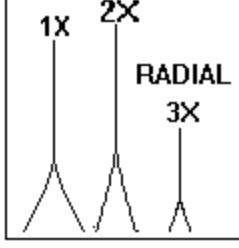
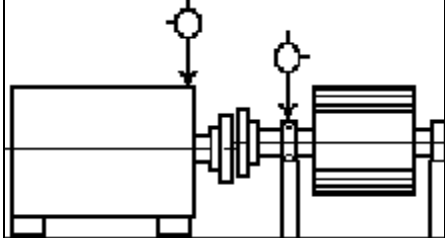
- Desbalanceamento de massas rotativas.
- Rotores excêntricos ou empenados.
- Eixo empenado.
- Desalinhamentos em geral.
- Rolamentos danificados ou inadequados.
- Correias fora de padrão.
- Cavitação/Refluxo hidráulico.
- Passagem de palhetas.
- Turbulência em mancais de deslizamento.
- Motores Elétricos defeituosos.
- Engrenamentos desgastados ou incorretos.
- Dentre outras.

O Quadro 1 detalha cada tipo de problema encontrado em máquinas rotativas, correlacionando o espectro típico, a relação de fase e o que possivelmente está provocando-o.

Quadro 1 – Quadro ilustrativo de Diagnósticos de Vibração
(FONTE: SÁ, 2000)

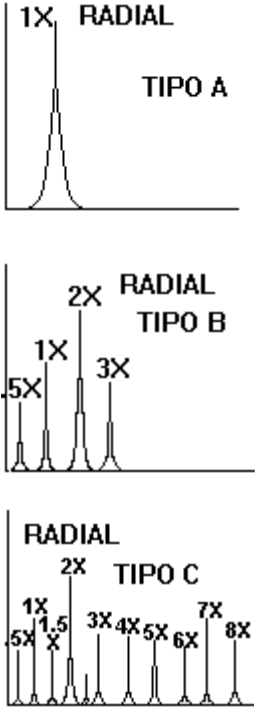
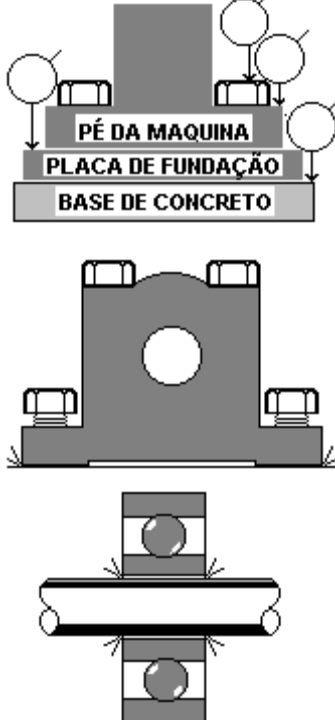
ESPECTRO TÍPICO	RELAÇÃO DE FASE	OBSERVAÇÕES
DESBALANCEAMENTO DE MASSA		
<p>1X RADIAL</p> 		<p>O Desbalanceamento de Forças estará em fase e será permanente. A amplitude devida ao Desbalanceamento crescerá com o quadrado da velocidade (3X de aumento da velocidade = 9X de aumento na vibração). 1X RPM sempre está presente e normalmente domina o espectro. Pode ser corrigida pela colocação, simplesmente, de um peso de balanceamento em um plano no centro de gravidade do Rotor (CG).</p>

ESPECTRO TÍPICO	RELAÇÃO DE FASE	OBSERVAÇÕES
<p>1X RADIAL</p> 		<p>O Desbalanceamento de Acoplamento tende a ficar 180° fora de fase no mesmo eixo. 1X está sempre presente e normalmente domina o espectro. A amplitude varia com o quadrado do crescimento da velocidade. Pode provocar vibrações axiais e radiais elevadas. A correção exige a colocação de pesos de balanceamento em pelo menos 2 planos. Observe que pode existir aproximadamente 180° de diferença de fase entre as horizontais OB e IB, bem como entre as verticais OB e IB.</p>
<p>1X AXIAL & RADIAL</p> 		<p>O Desbalanceamento do Rotor em Balanço causa elevado 1X RPM tanto na direção axial como na direção radial. Leituras axiais tendem a estar em fase, enquanto leituras de fase radiais podem ser instáveis. Rotores em balanço comumente têm desbalanceamento de força e de acoplamento, cada um dos quais exigirá igualmente que se faça a correção.</p>
ESPECTRO TÍPICO	ORELAÇÃO DE FASES	OBSERVAÇÕES
EIXO ARQUEADO		
<p>AXIAL</p> <p>1X</p> <p>2X</p> 		<p>Problemas de Arqueamento do eixo causam alta vibração axial com as diferenças de fase axial tendendo para 180° no mesmo componente da máquina. A vibração dominante é normalmente de 1X se a curvatura for próxima ao centro do eixo, mas será de 2X se a curvatura estiver próxima ao acoplamento (Ao fazer as medições seja cuidadoso com a orientação do transdutor , invertendo a direção do transdutor para cada medição axial).</p>

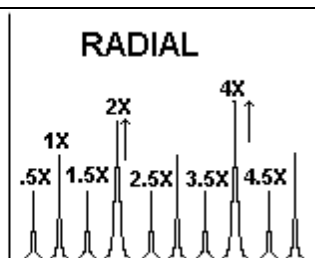
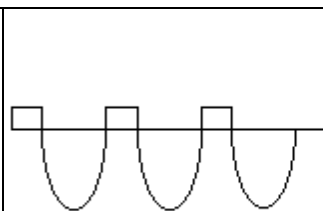
ESPECTRO TÍPICO	RELAÇÃO DE FASE	OBSERVAÇÕES
DESALINHAMENTO A - ANGULAR		
<p>AXIAL</p>  <p>B- PARALELO</p>		<p>O Desalinhamento Angular é caracterizado pela alta vibração axial, 180° fora de fase através do acoplamento. Caracteristicamente haverá alta vibração axial tanto com 1X quanto com 2X RPM. Entretanto não é incomum que 1X, 2X ou 3X sejam dominantes. Estes sintomas podem indicar também problemas de acoplamento.</p>
		<p>Desalinhamento Paralelo tem sintomas similares ao Angular, mas apresenta vibração radial alta que se aproxima de 180° fora de fase através do acoplamento. 2X é muitas vezes maior que 1X, mas sua altura relativa para 1X é habitualmente ditada pelo tipo e construção do acoplamento. Quando o Desalinhamento Angular ou Radial se torna severo, pode gerar picos de alta amplitude em harmônicos muito mais altos (4X-8X) ou mesmo toda uma série de harmônicos de alta frequência similar na aparência à folga mecânica. A construção do acoplamento influenciará muitas vezes a forma do espectro quando o Desalinhamento é severo..</p>

ESPECTRO TÍPICO	RELAÇÃO DE FASES	OBSERVAÇÕES

FOLGA MECÂNICA

 <p>1X RADIAL TIPO A</p> <p>5X 1X 2X 3X RADIAL TIPO B</p> <p>1X 1.5X 2X 3X 4X 5X 6X 7X 8X RADIAL TIPO C</p>	 <p>PÉ DA MAQUINA PLACA DE FUNDAÇÃO BASE DE CONCRETO</p>	<p>A folga Mecânica é indicada pelos espectros dos tipos A, B e C. O Tipo A é causado por folga/fragilidade Estrutural nos pés, base ou fundação da máquina; também pela deterioração do apoio ao solo, folga de parafusos que sustentam a base; e distorção da armação ou base (ex.: pé frouxo). A análise de fase revelará aproximadamente 180° de diferença de fases entre medições verticais no pé da máquina, local onde está a base e a própria base.</p> <p>O tipo B é geralmente causado por parafusos soltos no apoio da base, trincas na estrutura do skid ou no pedestal do mancal.</p> <p>O tipo C é normalmente provocado por ajuste impróprio entre partes componentes para forças dinâmicas do rotor. Causa o truncamento da forma de onda no tempo. O tipo C é muitas vezes provocado por uma folga linear do mancal em sua tampa, folga excessiva em uma bucha ou de elemento rotativo de um mancal de rolamento ou um rotor solto com folga em relação ao eixo. A fase tipo CX é muitas vezes instável e pode variar amplamente de uma medição para a seguinte, particularmente se o rotor muda de posição no eixo à cada partida. A folga Mecânica é, geralmente, altamente direcional e pode causar leituras bem diferentes se comparamos incrementos de 30° de nível na direção radial em todo o caminho entorno de uma caixa de mancal. Observe também que a folga causará muitas vezes múltiplos de subharmônicos a exatamente 1/2 ou 1/3 RPM (.5X, 1.5X, 2.5X, etc.).</p>
ESPECTRO TÍPICO	RELAÇÃO DE FASES	OBSERVAÇÕES

ROÇAMENTO DO ROTOR

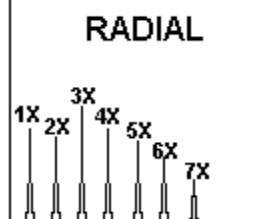


O Roçamento do Rotor produz espectro similar à folga mecânica quando as partes rotativas entram em contato com componentes estacionários. O atrito pode ser parcial ou em toda a rotação. Usualmente, gera uma série de frequências, muitas vezes excitando uma ou mais ressonâncias. Muitas vezes excita uma série completa de subarmônicos frações da velocidade de marcha ($1/2, 1/3, 1/4, 1/5, \dots, 1/n$), dependendo da localização das frequências naturais do rotor. O Roçamento do Rotor pode excitar muitas frequências altas (ruído de banda larga semelhante ao ruído do giz quando risca o quadro-negro). Ele pode ser muito sério e de curta duração se provocado pelo contato do eixo com o (Babbit) metal patente do mancal; mas menos sério quando o eixo roça em uma vedação, a pá de um misturador roça na parede de um tanque, e o eixo ou a luva roça no guarda acoplamento.


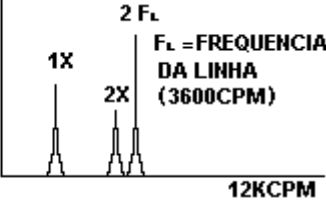
MANCAIS DE BUCHA

PROBLEMAS :

A - FOLGA E DESGASTE

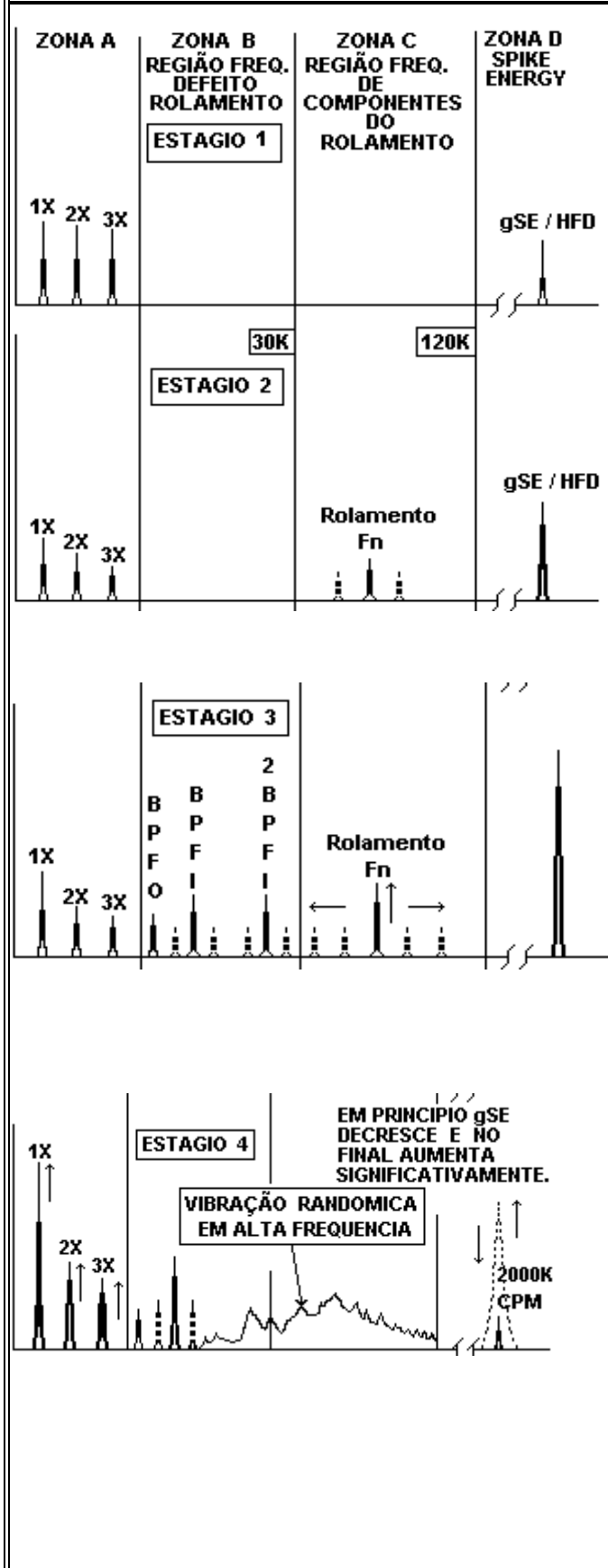


Os últimos estágios de desgaste dos mancais de bucha são normalmente evidenciados pela presença de séries inteiras de harmônicos da velocidade de operação (acima de 10 ou até 20). Mancais de bucha desgastados comumente admitirão

<p>C - CAVITAÇÃO</p>  <p>VIBRAÇÃO RANDOMICA EM ALTA FREQUENCIA</p> <p>1X BPF 120K</p>	<p>A cavitação normalmente gera energia em banda larga, de frequência mais alta, de caráter aleatória, que algumas vezes se superpõe a harmônicos de frequência de passo de lâmina. Normalmente, indica pressão de sucção insuficiente. A cavitação pode ser bastante destrutiva para a parte interna da bomba, se deixada sem correção. Ela pode particularmente erodir as palhetas do rotor. Quando presente, ela soa muitas vezes como se pedras estivessem passando através da bomba.</p>
<p>PROBLEMAS ELÉTRICOS</p>	
<p>A - EXCENTRICIDADE DO ESTATOR LAMINAS EM CURTO FERRO SOLTO</p>  <p>1X 2FL FL = FREQUENCIA DA LINHA (3600CPM) 12KCPM</p>	<p>Problemas no estator geram vibração alta em frequência da linha ($2FL=120\text{Hz}$). Problemas no estator produzem um espaço vazio estacionário igual entre o Rotor e o Estator, o que produz uma vibração bem definida em frequência. O Air Gap diferencial (Entreferro) não deve exceder 5% para motores de indução e 10% para motores síncronos. Amortecedores ou bases isoladas podem acarretar a vibração por excentricidade do estator. O ferro solto é devido à folga ou a folga do suporte do estator. Lâminas do estator curto circuitadas podem causar aquecimento localizado irregular, o que pode fazer dobrar o eixo do motor. Produzindo vibração localizada e quente que pode crescer significativamente ao longo do tempo de operação.</p>

MANCAIS DE ROLAMENTOS

4 ESTAGIOS DE FALHAS DE ROLAMENTOS :



ESTAGIO 1: As primeiras indicações de problemas de rolamentos aparecem nas Frequências Ultrassônicas na faixa aproximada de 20.000 à 80.000 Hz (1.200.000 a 3.800.000 CPM). Estas frequências são avaliadas através do Spike Energy (gSE), HFD (g) e Shock Pulse (dB). Por exemplo, o Spike Energy pode ocorrer primeiro a cerca de 0,25gSE no Estágio 1 (valor atual dependendo da localização da medição e da velocidade da máquina).

ESTÁGIO 2: Defeitos de pequena monta começam a "cercar" as Frequências Naturais dos componentes do rolamento (Fn) que ocorrem predominantemente na faixa de 30K a 120K CPM. Frequências das bandas laterais aparecem acima e abaixo do pico da frequência natural ao fim do Estágio 2. A energia de ponta cresce (por exemplo de 0,25 para 0,50 gSE).

ESTÁGIO 3: Frequências de defeitos de Rolamentos e seus Harmônicos aparecem (ver página sob o título "Frequências de Falha de Rolamentos em Conjunto Girante"). Quando aumenta o desgaste, aparecem mais Harmônicos da Frequência de defeito e cresce o número de bandas laterais, ambos em torno daquelas e das frequências naturais do Rolamento. Spike Energy (gSE), continua a crescer (por exemplo de 0,5 para mais de 1 gSE). O desgaste é agora, em geral, visível, e poderá se estender pela periferia do Rolamento, particularmente quando bandas laterais bem formadas acompanham harmônicos de Frequência de defeito do Rolamento. Substitua os Rolamentos agora.

ESTÁGIO 4: Caminhando para o fim, até mesmo a amplitude de 1X RPM é afetada. Ela cresce, e normalmente causa o

	<p>crescimento de muitos harmônicos da velocidade de operação. Defeitos discretos de rolamento e frequências naturais de componentes neste momento começam a "desaparecer", sendo substituídas por frequências altas de banda larga, aleatórias num "patamar de ruído". Além disso, as amplitudes tanto da frequência alta do patamar de ruído quanto da energia de ponta poderão na verdade decrescer; mas, imediatamente antes da falha a Spike Energy (gSE), usualmente crescerá para amplitudes excessivas.</p>
--	---

7.5.2 Análise dos óleos lubrificantes

Seus objetivos são dois: economizar lubrificantes e sanar os defeitos. Os modernos equipamentos permitem análises exatas e rápidas dos óleos utilizados em máquinas. É por meio das análises que o serviço de manutenção pode determinar o momento adequado para sua troca ou renovação, tanto em componentes mecânicos quanto hidráulicos. A economia é obtida regulando-se o grau de degradação ou de contaminação dos óleos. Essa regulação permite a otimização dos intervalos das trocas. A análise dos óleos permite, também, identificar os primeiros sintomas de desgaste de um componente. A identificação é feita a partir do estudo das partículas sólidas que ficam misturadas com os óleos. Tais partículas sólidas são geradas pelo atrito dinâmico entre peças em contato. A análise dos óleos é feita por meio de técnicas laboratoriais que envolvem vidrarias, reagentes, instrumentos e equipamentos. Entre os instrumentos e equipamentos utilizados temos viscosímetros, centrífugas, fotômetros de chama, peagômetros (medidor de pH), espectrômetros, microscópios, etc. O laboratorista, usando técnicas adequadas, determina as propriedades dos óleos e o grau de seus contaminantes. As principais propriedades dos óleos que interessam em uma análise são: índice de viscosidade, índice de acidez, índice de alcalinidade, ponto de fulgor e ponto de congelamento. Em termos de contaminação dos óleos, interessa saber quanto existe de: resíduos de carbono, partículas metálicas e água. Assim como no estudo das vibrações, a análise dos óleos é muito importante na manutenção preditiva. É a análise que vai dizer se o óleo de uma máquina ou equipamento precisa ou não ser substituído e quando isso deverá ser feito. Na Figura 33, o Téc. de Operação analisa visualmente a condição do óleo lubrificante.



Figura 33 – Inspeção visual do aspecto do óleo lubrificante
(Fonte: Autor)

7.5.3 Análise do estado das superfícies

Ao analisar as superfícies das peças, sujeitas aos desgastes provocados pelo atrito, pode-se controlar o grau de deterioração das máquinas e equipamentos. A análise superficial abrange, além do simples exame visual – com ou sem lupa – várias técnicas analíticas: endoscopia, holografia, estroboscopia e molde e impressão.

7.5.4 Análise estrutural

É por meio da análise estrutural que se detecta, por exemplo, a existência de fissuras, trincas e bolhas nas peças das máquinas e equipamentos. Em uniões soldadas, a análise estrutural é de extrema importância. As técnicas utilizadas na análise estrutural são: interferometria holográfica, ultrassonografia, radiografia (raios X), gamagrafia (raios gama) e ecografia. As informações recolhidas são registradas numa ficha, possibilitando ao responsável pela manutenção preditiva tê-las em mãos para as providências cabíveis. A Figura 34 mostra um exemplo de um programa básico de vigilância, de acordo com a experiência e histórico de uma determinada máquina.

PROGRAMA BÁSICO DE VIGILÂNCIA			
MÉTODOS UTILIZADOS	EQUIPAMENTOS VIGIADOS	EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS	PERIODICIDADE DA VERIFICAÇÃO
Medição de vibração	Todas as máquinas giratórias de potência média ou máxima e/ou equipamentos críticos: <ul style="list-style-type: none"> • motores; • redutores; • compressores; • bombas; • ventiladores. 	Medidor de vibração Analisador Sistema de vigilância permanente	3.000 a 1.500 horas
Medição das falhas de rolamentos	Todos os rolamentos	Medidor especial ou analisador	500 horas
Análise estroboscópica	Todos os lugares onde se quiser estudar um movimento, controlar a velocidade ou medir os planos	Estroboscópio do analisador de vibrações	Segundo a necessidade
Análise dos óleos	<ul style="list-style-type: none"> • Redutores e circuitos hidráulicos • Motores 	Feita pelo fabricante	6 meses
Termografia	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de alta-tensão • Distribuição de baixa-tensão • Componentes eletrônicos • Equipamentos com componentes refratários 	Subcontratação ("terceirização")	12 meses
Exame endoscópico	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros de compressores • Aletas • Engrenagens danificadas 	Endoscopia + fotos	Todos os meses

Figura 34 – Programa Básico de vigilância de equipamentos
(Fonte: FILHO, 2010)

Por outro lado, as técnicas preditivas em suas categorias são indicadas na Figura 35. Algumas técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END's), listadas na Figura, só podem ser aplicadas com o equipamento fora de operação, o que invalidaria a condição de que as técnicas preditivas são aplicáveis com o equipamento em funcionamento. As vantagens da manutenção preditiva são:

- aumento da vida útil do equipamento;
- controle dos materiais (peças, componentes, partes, etc.) e melhor gerenciamento;
- diminuição dos custos nos reparos;
- melhoria da produtividade da empresa;
- diminuição dos estoques de produção;
- limitação da quantidade de peças de reposição;
- melhoria da segurança;
- credibilidade do serviço oferecido;
- motivação do pessoal de manutenção;
- boa imagem do serviço após a venda, assegurando o renome do fornecedor

Radiações Ionizantes Raios X e Gamagrafia	Energia Acústica Ultrassom e Emissão acústica
Energia Eletromagnética Partículas magnéticas Correntes parasíticas	Fenômenos de Viscosidade Líquidos penetrantes
Inspeção Visual Endoscopia ou Boroscopia	Análise de Vibrações Nível global, Espectro de vibrações
Deteccão de Vazamentos	Pulso de choque
Análise de óleos lubrificantes ou isolantes Viscosidade, Número de neutralização (acidez ou basicidade), Teor de água, Insolúveis, Contagem de partículas Metais por espectrometria por infravermelho Cromatografia gasosa, Tensão interfacial, Rigidez dielétrica, Ponto de fulgor	Análise de Temperatura – Termometria Termometria convencional Indicadores de temperatura Pirometria de radiação Termografia
Ferrografia Ferrografia quantitativa Ferrografia analítica	Verificações de Geometria Metrologia convencional Alinhamento de máquinas rotativas
Ensaio Elétricos Corrente, Tensão, Isolamento, Perdas dielétricas, Rigidez dielétrica, Espectro de corrente ou tensão	Forças Células de carga, Teste de pressão Teste hidrostático, Teste de vácuo, Deteccão de trincas

Figura 35 – Técnicas de Manutenção Preditiva
(Fonte: BARONI, 2002)

8 CASO PRÁTICO – SUBSTITUIÇÃO DE MANCAL

O Equipamento dinâmico rotativo trata-se de uma bomba centrífuga que transporta dois tipos de fluidos: Óleo Combustível e Petróleo, tem uma vazão nominal da ordem de 250 m³/, uma Potência Elétrica de 180 CV (440V) e Rotação em torno de 3.570 rpm, esta bomba está localizada em um Parque de Bombas de uma refinaria petroquímica no polo industrial de Manaus e tem seu TAG (Etiqueta): B-621001-B (Vide Figura 36).



Figura 36 – Bomba centrífuga operando no Parque de Bombas da REMAN
(Fonte: Autor)

8.1 Análise dos gráficos de tendências e espectros de vibrações

Ao observar-se os gráficos de tendência do parâmetro “aceleração” do referido período, nota-se nitidamente que o mesmo apresentou uma elevação a partir do mês de Julho/2014 (Figuras 37 e 38), até então nada preocupante, mas, a tendência elevatória permaneceu constante, despertando um certo “alerta”, o que se observou ao longo do tempo que o parâmetro chegou ao alerta superior (*Upper Alert*), em meados de 02/2015, que foi setado em 20 G’s, e, chegou a ultrapassar o limite superior de falha (*Upper Fault*), que havia sido setado em 30 G’s. Diante disto, a Manutenção solicitou a parada imediata do equipamento para posteriores reparos a fim de evitar perda total do equipamento e possíveis danos a Técnicos de

Operação que estivessem próximos durante a falha, outros equipamentos e instalações próximas e ao meio ambiente. O próximo tópico versará sobre a correção feita.

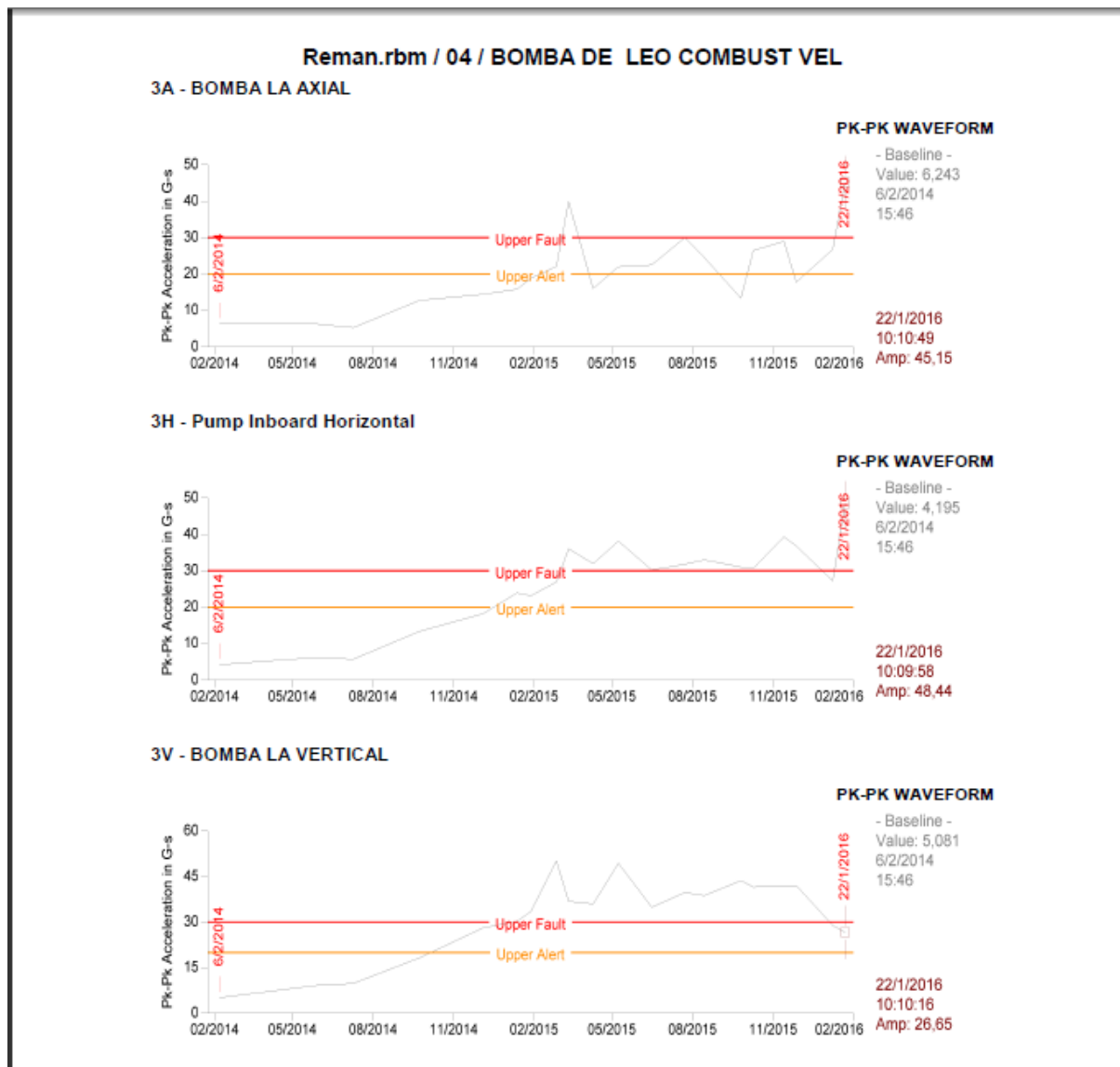


Figura 37 – Análise dos dados nos Pontos 3A, 3H e 3V do parâmetro “aceleração” no período de Fev/2014 a Fev/2016

(Fonte: REMAN/MA/ED)

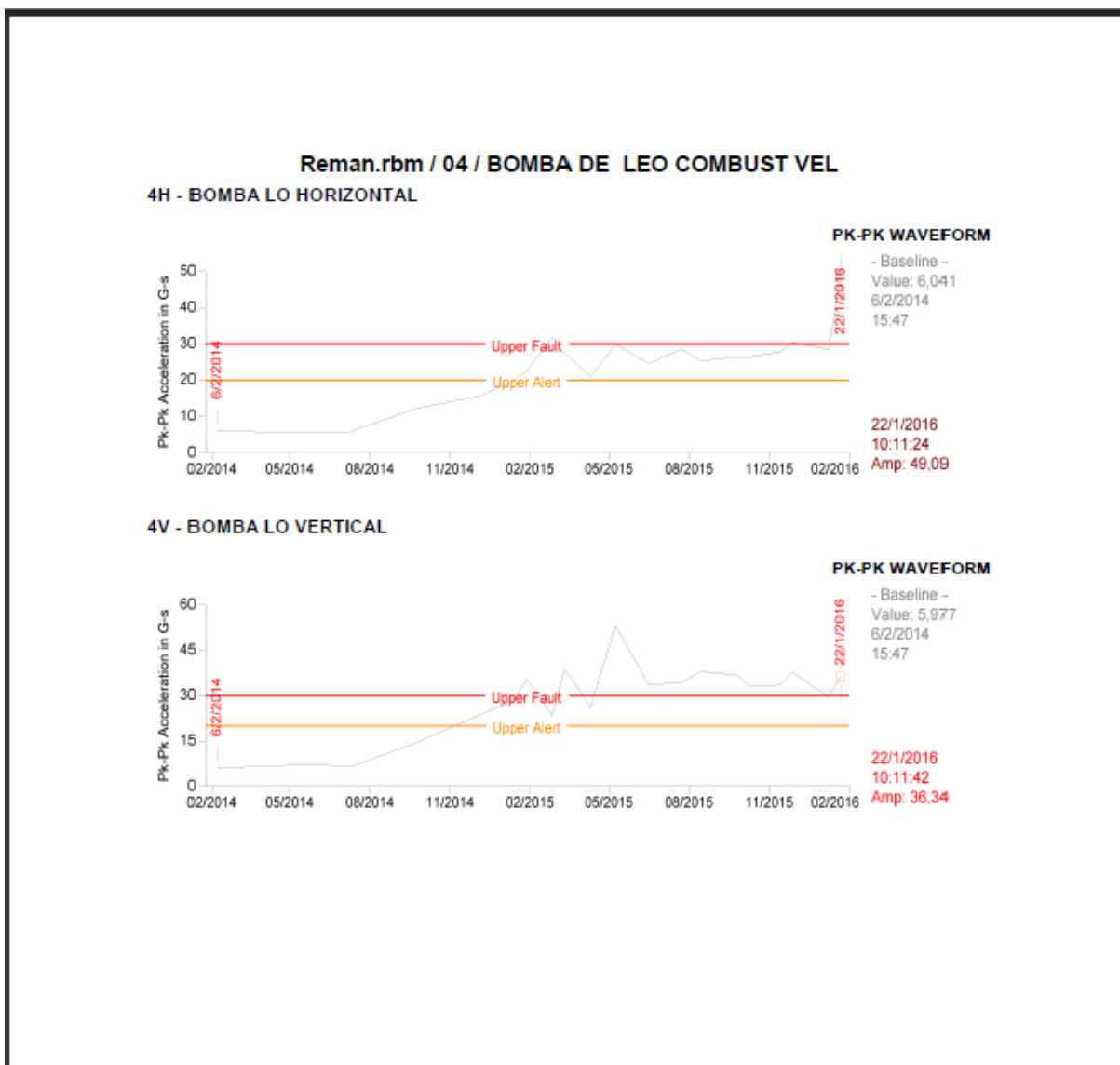


Figura 38 – Análise dos dados nos Pontos 4H e 4V do parâmetro “aceleração” no período de Fev/2014 a Fev/2016

(Fonte: REMAN/MA/ED)

Os espectros de vibração da Figura 39 nos mostra claramente os espectros de vibrações no domínio das frequências e a “assinatura espectral” de como se forma um defeito no mancal, pois inicialmente há vibrações de altas frequência que chegam ao seu limite e vão migrando para as baixas frequências até atingirem o limite máximo de operação (Vide Quadro 1 – Defeitos em mancais de rolamentos – Estágios 1, 2 e 3)

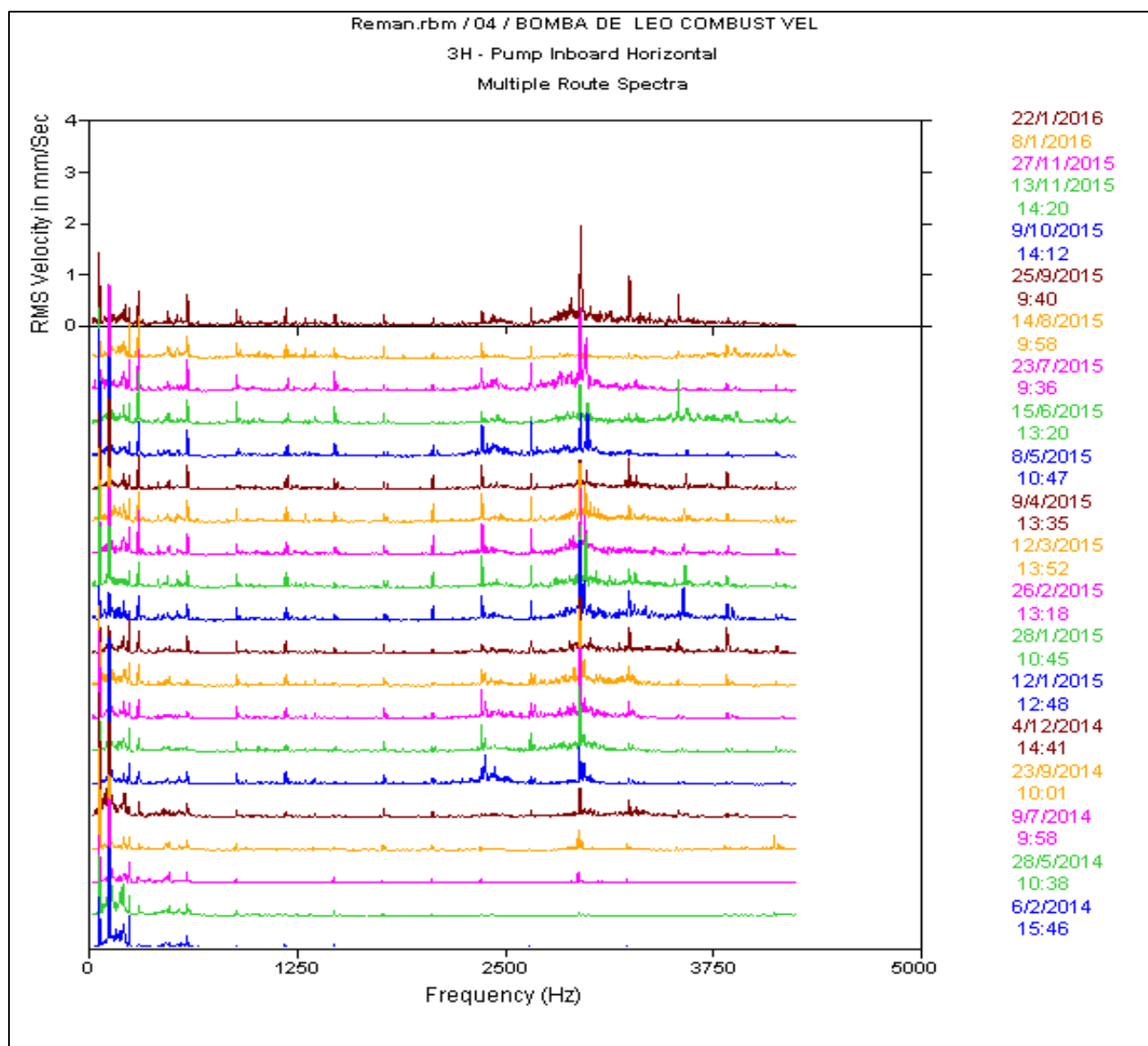


Figura 39 – Espectro de frequência em cascata no ponto 3H da Bomba B-621010-B
(Fonte: REMAN/MA/ED, 2017)

8.2 Correção do problema

Ao analisar o espectro de vibração verificou-se que a causa mais provável de vibração elevada seria falha no mancal de rolamento, em virtude destes defeitos produzirem vibrações em altas frequências, e, posteriormente vão migrando para as baixas frequências, assim, as alterações do nível global de vibração em seus estágios iniciais de desgaste são praticamente imperceptíveis. Os valores da Figura 40 ilustram a tendência elevatória, e, mais precisamente

no dia 26/Fev/2015 observou-se o valor de 22.07 G acima do alarme superior (20 G's). E, no dia 12/Mar/2015 constatou-se 39.82 G's, muito acima do limite superior de falha (30 G's).

List of Trend Points				

Area:	04	-->	TE	
Equipment:	MB 621001B	-->	BOMBA DE ÓLEO COMBUSTÍVEL	
Meas Point:	3A	-->	BOMBA LA AXIAL	
Parameter:	PK-PK WAVEFORM		(Pk-Pk Waveform in G-s)	
DATE	TIME	VALUE	ALARM	
----	----	----	----	----
06-fev-14	15:46	6.24		
28-mai-14	10:39	6.28		
09-jul-14	09:59	5.26		
23-set-14	10:01	12.77	Br	
04-dez-14	14:41	14.42	Br	
12-jan-15	12:48	15.82	Br	
28-jan-15	10:45	18.83	Br	
26-fev-15	13:18	22.07	C	-v
12-mar-15	13:53	39.82	D	-v
09-abr-15	13:35	16.02	Br	
08-mai-15	10:47	21.99	C	-v
15-jun-15	13:20	22.50	C	-v
23-jul-15	09:37	30.00	C	-v
14-ago-15	09:59	24.58	C	-v
25-set-15	09:40	13.36	Br	
09-out-15	14:13	26.45	C	-v
13-nov-15	14:21	28.97	C	-v
27-nov-15	13:19	17.73	Br	
08-jan-16	10:35	26.78	C	-v
22-jan-16	10:10	45.15	D	-v
ALARMS:		WARNING	ALERT	FAULT
		12.49	20.00	30.00

Figura 40 – Valores do parâmetro “aceleração” no Ponto 3A no período de 02/2014 a 01/2016 (Fonte: REMAN/MA/ED)

Após a constatação da elevada vibração do equipamento, e, a sua posterior parada para manutenção, realizou-se a troca dos três (03) mancais de rolamento, a Figura 41 demonstra um mancal genérico e suas partes, já no Anexo 1 pode-se ver o mancal que foi substituído.

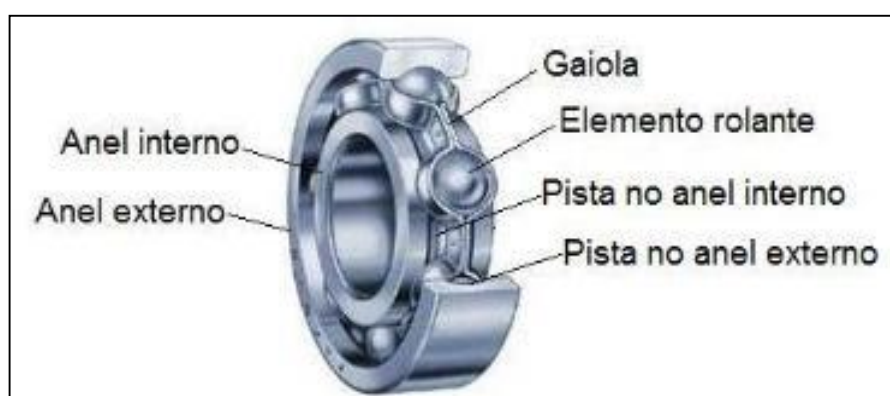


Figura 41 – Mancal de rolamento e suas partes construtivas (Fonte: UFSCar, 2010)

8.3 Monitoramentos pós-correção

Após realizada a troca dos mancais de rolamento, realizou-se novas medições de vibrações no período de 05/2015 a e, os valores do parâmetro “aceleração” manteve-se dentro da normalidade, como se pode ver na Figura 42 e no Relatório Técnico do Anexo.

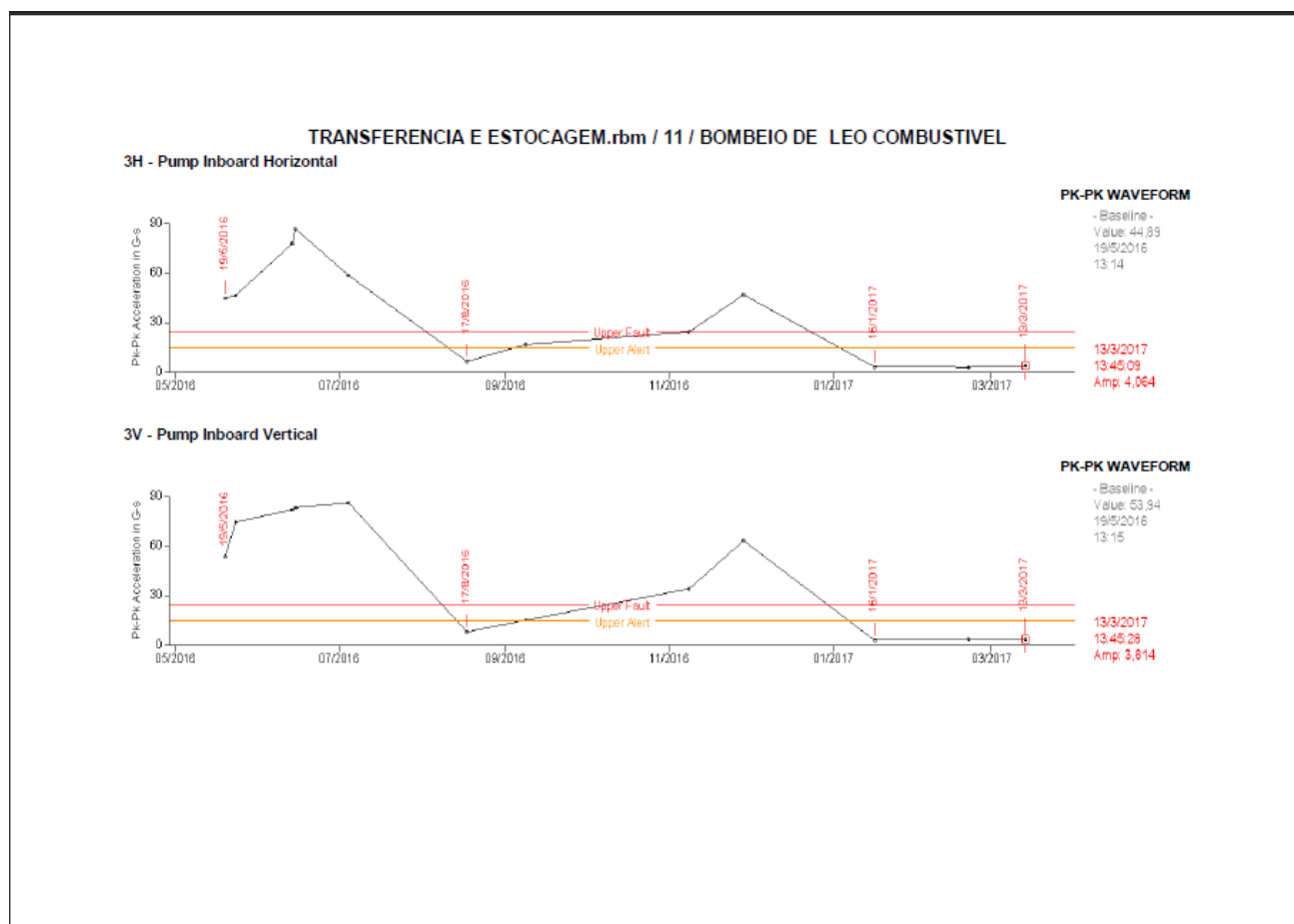


Figura 42 – Análise dos dados nos Pontos 3H e 3V do parâmetro “aceleração” no período de Fev/2014 a Fev/2016

(Fonte: REMAN/MA/ED)

9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Procurou-se de toda forma neste trabalho apresentar algumas técnicas e recomendações de manutenção preventiva, dando-se uma maior ênfase à análise de vibração em bombas centrífugas industriais devido à sua larga utilização.

Iniciou-se a abordagem na evolução da manutenção industrial, suas etapas e necessidades de evolução, os tipos de manutenção existentes, seguido dos tipos de bombas industriais, seus aspectos construtivos, tipos e aplicações industriais, vantagens, etc.

Este trabalho visa contribuir com a operação das diversas empresas prolongando a vida útil das bombas centrífugas, por meio de conhecimento nas principais técnicas de manutenção preventiva.

Como proposta para trabalhos futuros seria interessante um aprofundamento da técnica de análise de vibrações como um monitoramento e acompanhamento de um compressor industrial e análise de dados colhidos na planta visto que com esta técnica é possível detectar falhas em rolamentos, desbalanceamentos, excentricidade, folgas em mancais, com a finalidade de que o equipamento sempre esteja funcionando com confiabilidade e disponibilidade que são frutos de uma adequada manutenção.

Diante de tudo o que foi visto até aqui se pode perceber que a Técnica de Manutenção Preditiva de Análise de Vibrações é a mais confiável e aplicável aos equipamentos dinâmicos rotativos e alternativos, pois a mesma previne com um alto grau de confiabilidade a integridade dos mesmos. Bastando tão somente ser realizada com periodicidade programada, equipamentos especiais e calibrados para sentir a vibração dos equipamentos e o comprometimento de todos os envolvidos no processo de gerir e maximizar o processo de manutenção industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCO-VERDE, M. M. **Introdução à Análise de Vibrações**. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras, Rio de Janeiro: 2015.

BARONI, Tarcísio et al. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2002.

BRANCO, G. F. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2008.

BRASIL, A. N. **Apostila sobre Hidráulica Básica e Máquinas de Fluxo**. Itaúna: Editora da Universidade de Itaúna. 2013.

DECKMANN, S.A.; POMPILIO, J.A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. DSE – FEEC – UNICAMP. Campinas: 2010.

FILHO, H.R.P.; Manutenção preditiva: acompanhando as condições dos equipamentos. Disponível em: <https://qualidadeonline.wordpress.com/2010/03/08/manutencao-preditiva-acompanhando-as-condicoes-dos-equipamentos/>; Postado em 08/03/2010. Acesso em: 17/05/2017.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Ed. Atlas. 1991.

HORTA, D.A. **Apostila sobre Bombas – Curso Técnico em Mecânica**. IFF – Campus Campos Centro, 2011.

KSB Bombas Hidráulicas S/A - **Manual de Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**. 3ª Edição. 1991.

MOUBRAY, Jhon. **RCM – Reability Centered Maintenance**. Ed. SQL Brasil. 2ª Edição, 1997.

MACYNTIRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Editora Guanabara – 2ª Edição.

PINJALA, S.; PINTELON, L.; VERECKA, A. **An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies.** International Journal of Production Economics, v.104, n.13, p.214-229, 2006.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção: Função Estratégica – 4ª Edição.** Rio Janeiro: Qualitymark Ed., 2012.

SÁ, Engº. M. **Curso de Vibrações.** PETROBRAS/E&P-BC/GELOG/GEOFI/GMAN. Rio de Janeiro, Macaé, 2000.


SILVA, E. L da; MENEZES, E.M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação.** Florianópolis: Ed. Atual, 2005. Disponível em: <http://www.ppgep.ufsc.br>.

VERGARA, S.C. **Projetos e relatórios de pesquisas em Administração.** São Paula: Ed. Atlas, 2003.

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva.** Minas Gerais: Indg Ltda, 2004.

*Obs.: Os acessos às Figuras 27 e 28 foram feitos através do Website “Mundo Manutenção”: Disponível em: <http://manutencosc.jlle1.com/?p=960>, acesso realizado em: 25/05/2017.

ANEXO

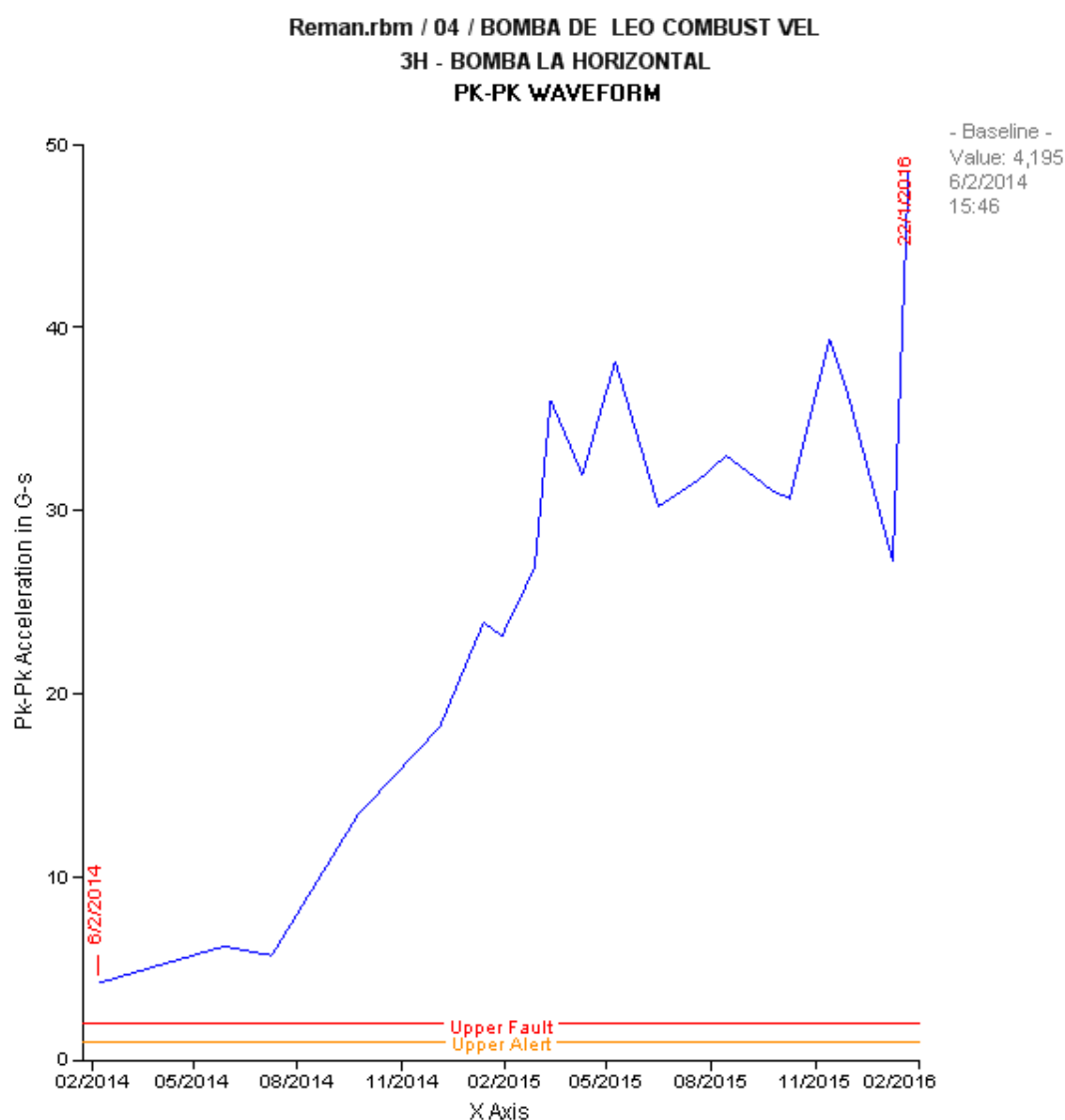
RELATÓRIO DE ANÁLISE DA PREDITIVA		 PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. PETROBRAS UN-REMAN
Cliee: OP/TEU	Ref.:	

B-621001B Data: 23/05/2016 Analista: Franklim

Área: PARQUE DE BOMBAS DA ÁREA NORTE

EQUIPAMENTO: BOMBA CENTRÍFUGA. **FUNÇÃO:** BOMBEIO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL
ACIONAMENTO: MOTOR ELÉTRICO

ANÁLISE: A bomba centrífuga B-621001B, apresenta uma elevação na tendência de vibração no parâmetro aceleração conforme gráfico abaixo:



A elevação da vibração no parâmetro aceleração do ponto 3H se deu de forma gradativa entre 06/02/2014 até 22/01/2016. A elevação da vibração no parâmetro aceleração se da devido a desgaste no mancal de rolamentos.

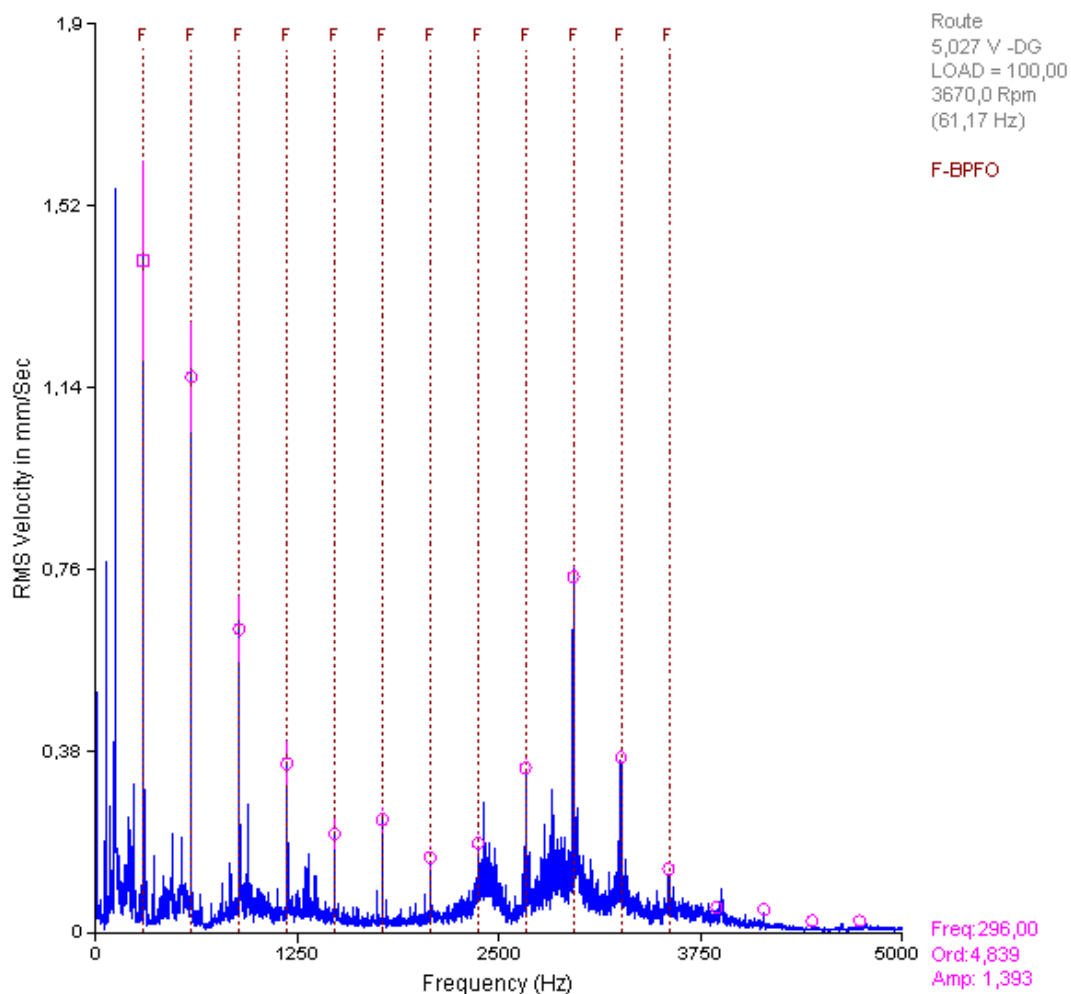
MANCAIS DE ROLAMENTOS DA B-621001B

MANCAL LA				MANCAL LOA			
SKF 7311				NU3111			
FREQÜÊNCIAS DE FALHAS							
FTF	BSF	BPFO	BPFI	FTF	BSF	BPFO	BPFI
24,68Hz	124,88Hz	296,12Hz	437,88Hz	24,64Hz	151,47Hz	271,06Hz	401,78Hz

*FTF(frequência de falha da gaiola), BSF(frequência de falha das esferas),BPFO(frequência de falha da pista externa),BPFI(frequência de falha da pista interna).

ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO MANCAL LA, PONTO 3H

TRANSFERENCIA E ESTOCAGEM.rbm / 11 / BOMBEIO DE LEO COMBUSTIVEL
 3H - Pump Inboard Horizontal
 23/5/2016 10:01:24



O espectro de frequências mostra a família de harmônicos que coincidem com a frequência de falha da pista externa do rolamento SKF 7311.

Equipamento: B-621001B. **Data:** 08/11/2016 **Analista:** Téc. Man. P. Franklim.

Área: Pq. De bombas da área norte.

Equipamento: Bomba centrífuga Worthington 4HQ-104"B"

Rotação: 3570rpm

Sintoma: Início de degradação de rolamentos por oxidação alveolar (pitting) devido à presença de condensado dentro da caixa de mancal.

ANÁLISE

Foi relatado pela lubrificação e constatado pela preditiva, que há presença de condensado na caixa de mancal das bombas B-621001A/B. Relembrando que a última intervenção nestes equipamentos foi para troca de rolamentos e os mesmos estavam bem degradados pela oxidação.



A oxidação estava concentrada somente na porção do rolamento que ficava em contato com o óleo/condensado, nível inferior.

GRÁFICOS DE TENDÊNCIA

Nota-se nos gráficos de tendência, uma elevação no parâmetro aceleração que realça problemas em alta frequência, neste caso rolamentos. A elevação na bomba 01B ela é bastante acentuada.

B-621001B

