

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

RODRIGO DOS SANTOS SILVA

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE EM BOMBAS CENTRÍFUGAS NO PROCESSO
DE TRATAMENTO DE CALDO EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

Ilha Solteira

2023

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO DOS SANTOS SILVA

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE EM BOMBAS CENTRÍFUGAS NO PROCESSO
DE TRATAMENTO DE CALDO EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
– UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Aparecido
Carlos Gonçalves

Ilha Solteira

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

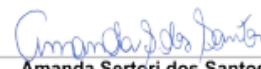
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586e Silva, Rodrigo dos Santos.
Estudo de confiabilidade em bombas centrífugas no processo de tratamento de caldo em uma usina sucroalcooleira / Rodrigo dos Santos Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
61 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves
Inclui bibliografia

1. Bombas centrífugas. 2. Confiabilidade. 3. Sucroalcooleira.



Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Estudo de Confiabilidade em Bombas Centrífugas no Processo de Tratamento de Caldo em uma Usina Sucroalcooleira

ALUNO: Rodrigo dos Santos Silva RA:172055423

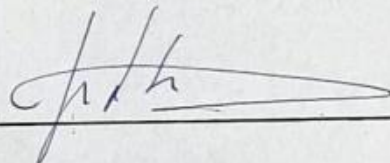
Orientador: Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora


Nota Obtida: 9,5

Comissão Examinadora:

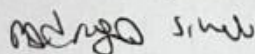
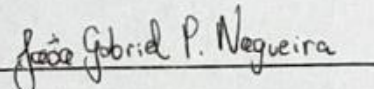
Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves
Presidente (orientador)



Prof. Dr. Marcio Antonio Bazani



Eng. João Gabriel Pereira Nogueira



Assinatura do Aluno

Ilha Solteira, 28 de Junho de 2023.

DEDICATÓRIA

À minha mãe, meu pai e minhas irmãs, que sempre estiverem ao meu lado me apoiando a ser o melhor possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar oportunidades, sabedoria, conhecimento e principalmente saúde.

À toda minha família por todo o suporte e incentivo durante o curso de graduação, à minha Mãe, Cristiane, meu pai, Antonio, as minhas irmãs Nathalia e Nayara, aos meus tios Alberto e Roberto.

Ao meu amigo Felipe por todo apoio e suporte durante o curso de graduação e por todos os momentos juntos em Ilha Solteira.

Ao meu orientador Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves pelo apoio, paciência e conhecimento transmitido durante à realização deste trabalho.

À todos os meus colegas de faculdade, em especial aqueles da turma 17/2 do curso de Engenharia Mecânica por toda a colaboração e por todo esse período de convivência. À todos os professores e servidores da Unesp-FEIS em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica que ajudaram na minha formação acadêmica.

RESUMO

Bombas centrífugas são utilizadas amplamente na indústria para transporte de fluidos devido a sua flexibilidade operacional. As bombas centrífugas são projetadas para trabalhar a uma determinada vazão com uma determinada altura manométrica de recalque, esse ponto de trabalho é determinado como ponto de melhor eficiência, porém dependendo da instalação ou condição operacional essa vazão pode variar. Devido à flexibilidade no processo e/ou condições não previstas, algumas bombas podem trabalhar a vazões muito diferentes do ponto de melhor eficiência, o que prejudica seu funcionamento. Esse prejuízo pode ser visto pela alta taxa de falhas dessas bombas e conseqüentemente baixa confiabilidade das mesmas. O objetivo desse trabalho é elaborar um estudo de confiabilidade de bombas centrífugas operando no processo de Tratamento de Caldo em uma Usina Sucroalcooleira, a fim de relacionar casos de bombas operando a vazões diferentes do ponto de melhor eficiência com baixa confiabilidade. Para realização do estudo foi levantado o histórico de falhas de bombas centrífugas dessa unidade em um período de 64 meses, classificadas as bombas de alta e baixa confiabilidade, verificados os dados de projeto das bombas classificadas, esses dados foram comparados com os dados de vazão real no período de estudo. As bombas de baixa confiabilidade foram aquelas que apresentaram vazões fora da faixa de 70% a 120% do BEP. Conclui-se que o superdimensionamento de bombas centrífugas e/ou operação com vazões muito distantes do ponto de projeto caminham em sentido oposto ao da confiabilidade.

Palavras-chave: Bombas Centrifugas; Confiabilidade.

ABSTRACT

Centrifugal pumps are widely used in industry to transport fluids due to their operational flexibility. Centrifugal pumps are designed to work at a given flow rate with a given pressure head, this working point is determined as the best efficiency point, but depending on the installation or operating condition, this flow rate may vary. Due to flexibility in the process and/or unforeseen conditions, some pumps can work at flows that are very different from the point of best efficiency, which impairs their operation. This damage can be seen by the high failure rate of these pumps and consequently their low reliability. The objective of this work is to carry out a reliability study of centrifugal pumps operating in the Juice Treatment process in a Sugar and Alcohol Plant, in order to relate cases of pumps operating at different flow rates from the point of best efficiency with low reliability. To carry out the study, the history of failures of centrifugal pumps of this unit was raised over a period of 64 months, the pumps of high and low reliability were classified, the project data of the classified pumps were verified, these data were compared with the actual flow data in the study period. Low reliability pumps were those that had flow rates outside the range of 70% to 120% of the BEP. It is concluded that the oversizing of centrifugal pumps and/or operation with flow rates that are far from the design point go in the opposite direction to reliability.

Keywords: Centrifugal pumps, reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento de uma bomba centrífuga.....	19
Figura 2 - Ação da força centrífuga	20
Figura 3 - Representação de uma bomba centrífuga monoestagio	21
Figura 4 - Curva carga (H) x vazão (Q)	22
Figura 5 - Curva potência absorvida (Pot abs) x vazão (Q).	23
Figura 6 - Curvas Rendimentos Total(η) x Vazão (Q)	24
Figura 7 - Curvas características apresentadas pelo fabricante.....	27
Figura 8 - Curva do sistema	28
Figura 9 - Parte estática e dinâmica na curva do sistema	28
Figura 10 - Ponto de trabalho.....	29
Figura 11 - Representação gráfica do NPSH requerido	33
Figura 12 - Ponto de melhor eficiência BEP	33
Figura 13 - Seleção da bomba centrífuga	35
Figura 14 - Curva de bombas centrífugas operando em serie Erro! Indicador não definido.	
Figura 15 - Associação de bombas em serie	37
Figura 16 - Curvas de bombas centrífugas operando em serie.....	37
Figura 17 - Limite operacional.....	39
Figura 18 - Operação fora da região ideal.....	39
Figura 19 - Ilustração dos esforços radiais em bombas centrífugas de simples voluta.	41
Figura 20 - Ilustração da recirculação no rotor	42
Figura 21 - Gráfico de Vazão Bomba TC-FE1-BB01.....	48
Figura 22 - Gráfico de Vazão Bomba TC-FE1-BB02.....	48
Figura 23 - Gráfico de Vazão Bomba TC-FP1-BB01/02.....	49
Figura 24 - Gráfico de Vazão Bombas TC-FR1-BB01/02.....	50
Figura 25 – Grafico de Vazão Bombas TC-FA1-BB01/02	49
Figura 26 -Gráfico de Vazão Bombas TC-FQ1-BB01/02	51
Figura 27 - Gráfico de Vazão Bombas TC-FM1-BB01/02	52
Figura 28 - Fluxograma atual da Bomba TC-FE1-BB02.....	54
Figura 29 - Fluxograma Proposto para a bomba TC-FE1-BB02	55
Figura 30 - Fluxograma das Bombas TC-FP1-BB01/02.....	56

Figura 31 - Fluxograma sugerido para as bombas TC-FP1-BB01/02	57
Figura 32 - Fluxograma das Bombas TC-FR1-BB01/02.....	58
Figura 33 - Fluxograma sugerido para as bombas TC-FR1-BB01/02	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bombas de baixa Confiabilidade	44
Tabela 2 - Bombas de alta Confiabilidade.....	45
Tabela 3 - Dados de projeto das Bombas centrifugas de baixa confiabilidade	45
Tabela 4 - Dados de projeto das Bombas centrifugas de alta confiabilidade	46
Tabela 5 - Controle de vazão bombas de baixa confiabilidade	46
Tabela 6 - Controle de vazão bombas de alta confiabilidade	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Histórico de falhas das bombas centrífugas que mais falharam	42
Quadro 2 - Histórico de falhas das bombas centrífugas que menos falharam	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMT	Altura Manométrica Total
BEP	Best Efficiency Point – Ponto de Melhor Eficiência
COI	Centro de Operações Industriais
Ft Foot	Pé
H Head	Altura de Coluna de Líquido
Kgf	Quilograma força
Lbf	Libra força
M	Metro
MTBF	Mean Time Between Failures
Neq	Número de Equipamentos
NPSHa	Net Positive Suction Head Available – Altura Líquida Positiva de Sucção Disponível
NPSHr	Net Positive Suction Head Required – Altura Líquida Positiva de Sucção Requerida
P	Período
Ph	Perdas Hidráulicas
Pm	Perdas Mecânicas
Pot abs	Potência Absorvida
Pot u	Potência Útil
Pv	Perdas Volumétricas
Q	Vazão
Rpm	Rotações por minuto
SAP	Systemanalysis Programmentwicklung
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
TMEF	Tempo médio entre falhas
γ	Peso específico
H	Rendimento
Hh	Rendimento Hidráulico
Hm	Rendimento Mecânico
Hv	Rendimento Volumétrico
λ	Taxa de falhas (Número de intervenções)

ρ Massa específica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo do trabalho	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Confiabilidade.....	15
2.1.1	Vantagens da aplicação da confiabilidade	16
2.1.2	Fatores básicos de falha.....	17
2.1.3	Parâmetros básicos da confiabilidade	17
2.1.3.1	Confiabilidade.....	17
2.1.3.2	Falha na confiabilidade.....	17
2.1.3.4	Taxa de falhas.....	17
2.1.3.5	Tempo médio entre falhas (TMEF).....	17
2.2	Bombas	18
2.2.1	Bombas centrífugas.....	18
2.2.1.1	Funcionamento das bombas centrífugas.....	18
2.2.1.2	Componentes de uma bomba centrífuga.....	20
2.2.1.3	Classificações das bombas centrífugas	21
2.2.1.4	Curvas de carga (H) x vazão (Q)	21
2.2.1.5	Curvas potência absorvida (Pot abs) x vazão(Q).....	22
2.2.1.6	Curvas rendimentos total(η) x vazão (Q).....	24
2.2.1.7	Curvas npsH req (NPSH req) x vazão (Q)	24
2.2.2	Fatores que alteram as curvas características	24
2.2.2.1	Variação do diâmetro do rotor.....	25
2.2.2.2	Variação da rotação do rotor	25
2.2.2.3	Variação nas propriedades dos fluidos	26

2.2.3	Apresentação das curvas características.....	26
2.2.4	Curva do sistema	27
2.2.4.1	Fatores que alteram a curva do sistema.....	29
2.2.5	Determinação do ponto de trabalho	29
2.2.6	NPSH	30
2.2.6.1	NPSH disponível	30
2.2.6.2	NPSH requerido.....	31
2.2.6.2.1	Representação gráfica do NPSH requerido.....	32
2.2.7	Ponto de melhor eficiência (BEP - best efficiency point).....	33
2.2.8	Seleção de bombas centrífugas	34
2.2.9	Operação de bombas centrífugas.....	35
2.2.9.1	Bombas centrífugas operando em série	36
2.2.9.2	Bombas centrífugas operando em paralelo	37
2.2.10	Problemas relacionados a bombas centrífugas	38
2.2.10.1	Problemas relacionados a vazão fora do BEP.....	39
2.2.10.1.1	Cavitação por falta de NPSH disponível.....	39
2.2.10.1.2	Vida reduzida de mancal e selo mecânico.....	40
2.2.10.2	Problemas relacionados à vazão abaixo do BEP	41
2.2.10.2.1	Elevação da temperatura.....	41
2.2.10.2.2	Recirculação	41
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	42
3.1	Histórico de falhas	42
3.2	Classificação de bombas centrífugas	44
3.3	Dados do projeto	45
3.4	Dados operacionais.....	46
3.5	Comparativos entre dados de projeto/operacionais.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52

4.1	Relação entre falhas e condição operacional	52
4.1.1	Falhas x condição operacional - TC-FE1-BB01	52
4.1.2	Falhas x condição operacional - TC-FE1-BB02	53
4.1.3	Falhas x condição operacional - TC-FP1-BB01/02	55
4.1.4	Falhas x condição operacional - TC-FR1-BB01/02	57
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

As bombas são máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Sendo uma máquina geratriz, ela transfere o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é comunicado ao líquido sob as formas de energia de pressão e cinética. Alguns autores chamam-nas de máquinas operatrizes hidráulicas, porque realizam um trabalho útil específico ao deslocarem um líquido (BRASIL, 2010).

As bombas centrífugas são as mais utilizadas pela indústria em geral, quaisquer processos que exigem movimentação de fluidos, essa movimentação é feita geralmente por uma bomba centrífuga, são muito utilizadas não só para transporte de fluidos, mas também para controle de algumas variáveis no processo como: pressão, vazão, temperatura, nível, pH, velocidade transporte de diferentes fluidos (MATTOS, 1998). O controle dessas variáveis é indispensável para a produtividade e segurança de processo em usinas sucroalcooleiras, dessa forma bombas centrífugas têm papel importante na produtividade e segurança. Este trabalho apresenta um estudo de confiabilidade de bombas centrífugas, realizado em equipamentos operados no setor de Tratamento de Caldo em uma usina Sucroalcooleira.

A indústria sucroalcooleira utiliza equipamentos estáticos, dinâmicos e elétricos em todos seus segmentos. Dentre os equipamentos dinâmicos, estão as bombas centrífugas, muito utilizadas no Tratamento de Caldo. Em unidades sucroalcooleiras há diversas aplicações para bombas centrífugas, desde menos severas como bombas para bombeamento de água, até bombas operando com produtos perigosos, inflamáveis, a altíssimas pressões e temperatura. Por ser um equipamento muito importante a unidades de processo, normalmente são instaladas com uma bomba reserva, a fim de garantir a continuidade operacional em casos de falha da bomba principal. Na maioria dos casos, em caso de falha da bomba principal e reserva, a unidade deve ser parada, causando prejuízos à companhia e em alguns casos colocando em riscos as instalações e pessoas. As bombas centrífugas são projetadas para trabalhar a uma determinada vazão com uma determinada altura manométrica de recalque. Esse ponto de trabalho é determinado como ponto de melhor eficiência (em inglês BEP – Best Efficiency Point), porém dependendo da instalação ou condição operacional essa vazão pode variar. As normas referentes a bombas centrífugas recomendam que bombas operem dentro de uma faixa operacional, essa faixa

compreende entre 70% e 120% da vazão do ponto de melhor eficiência. (HYDRAULIC INSTITUTE, 2017). Devido à flexibilidade no processo e/ou condições não previstas, algumas bombas podem trabalhar muito longe da faixa operacional adequada, o que prejudica seu funcionamento. Esse prejuízo pode ser visto pela alta taxa de falhas dessas bombas e conseqüentemente baixa confiabilidade delas. Bombas com baixa confiabilidade geram um alto custo de manutenção por apresentarem altas taxas de falha e baixa disponibilidade para operação. Essa baixa disponibilidade pode levar a uma parada não programada da unidade de processo, aumentando ainda mais o prejuízo pela falha da bomba. Bombas operando fora do ponto de melhor eficiência representam também desperdício de energia.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

Desenvolver um estudo de confiabilidade de bombas centrífugas operando no setor de tratamento de caldo de uma usina Sucroalcooleira, com o intuito de relacionar casos de bombas operando fora da faixa de vazão aceitável com baixa confiabilidade. No caso de bombas com baixa confiabilidade por operarem fora da faixa de vazão adequada, são indicadas soluções com objetivo de aumentar sua confiabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentado uma breve revisão bibliográfica dos principais conceitos sobre a confiabilidade e bombas, em especial as bombas centrífugas

Tanto a confiabilidade quanto as bombas centrífugas, possuem um imenso potencial e proporcionam uma vasta gama de benefícios positivos para as indústrias do ramo sucroalcooleiro, dentre outras.

2.1 CONFIABILIDADE

Desde a década de 1960, a análise probabilística de riscos tem sido desenvolvida e aplicada nos mais diversos ramos industriais sendo impulsionado em meados da década de 1970, pela publicação do relatório Wash1400 (LAFRAIA, 2001).

A confiabilidade surgiu nos séculos XX devido ao fato de que vários equipamentos e sistemas técnicos começaram a realizar importantes funções industriais, sendo útil também para a segurança das pessoas e seus bens. A teoria da

confiabilidade foi desenvolvida, inicialmente, para atender as necessidades da indústria eletroeletrônica, pois os primeiros sistemas complexos surgiram nesse ramo da engenharia. Tais sistemas possuem componentes relativamente confiáveis, porém seu grande número gera uma confiabilidade baixa. Dessa forma, foi desenvolvida uma disciplina matemática aplicada, especializada nessa área, que permitiu um avanço nos índices de confiabilidade na fase de concepção, que serviu de base para melhoria em manutenção e para estimar a confiabilidade através de testes ou exploração especial. (GNEDENKO; USHAKOV, 1995).

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), em seu sentido mais amplo, a confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas, ou seja, confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas, por um período predeterminado. Os conceitos de confiabilidade e qualidade estão atrelados entre si, o que faz com que frequentemente eles sejam confundidos entre si. Confiabilidade incorpora a passagem do tempo, o que não ocorre com a qualidade, já que consiste na descrição de um item. Um exemplo dado por Fogliatto e Ribeiro (2009) é o de dois transistores, que apresentam qualidade idêntica, mas o primeiro transistor possui uma confiabilidade provavelmente maior, pois será usado em um ambiente de menor estresse. Pode-se concluir que alta confiabilidade implica em qualidade, porém a recíproca não é verdadeira. Quando um consumidor adquire algum produto, ele está ciente de que este pode vir a falhar em algum momento. Para se ter alguma segurança quanto a isso, a empresa oferece um tempo de garantia, baseada na confiabilidade, sendo uma forma de proteção legal para falhas que ocorram em dado período.

2.1.1 VANTAGENS DA APLICAÇÃO DA CONFIABILIDADE

Ao se aplicar técnicas de confiabilidade aumenta-se os lucros devido a: menos paradas de produção não programadas, menores custos de manutenção, operação e apoio logístico, menores perdas por lucro cessante e menores possibilidades de acidentes (MAGALHÃES, 2002). A confiabilidade permite aplicação de investimentos baseados em dados quantitativos de continuidade operacional, segurança e meio ambiente. Permite também a eliminação de causas básicas de paradas não programadas de produção. Empresas que trabalham com um ótimo nível de

confiabilidade atuam nas causas básicas dos problemas e não nos seus sintomas, através de: histórico de falhas dos equipamentos, determinação das causas básicas das falhas, prevenção de falhas em equipamentos similares e determinação de fatores críticos para manutenção de equipamentos.

2.1.2 FATORES BÁSICOS DE FALHA

Os produtos, sistemas e/ou equipamentos falham por três fatores básicos, como: falha de projeto, falha na fabricação/produção ou falha na utilização.

2.1.3 PARÂMETROS BÁSICOS DA CONFIABILIDADE

2.1.3.1 CONFIABILIDADE

Confiabilidade é definida como a probabilidade de um produto, sistema e/ou equipamento cumprir a função para que foi projetado com sucesso por um período determinado, sob condições de operações especificadas (MAGALHÃES, 2002).

2.1.3.2 FALHA NA CONFIABILIDADE

Falha na confiabilidade é definida como a impossibilidade de um produto, sistema e/ou equipamento cumprir sua função na condição requerida (MAGALHÃES, 2002).

2.1.3.4 TAXA DE FALHAS

Taxa de falhas é a frequência com que as falhas ocorrem em um determinado período, medida pelo número de falhas por um período, como horas, dias, meses ou anos (MAGALHÃES, 2002). Normalmente, a taxa de falha é medida por λ .

2.1.3.5 TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (TMEF)

Normalmente, para se medir confiabilidade de equipamentos, se utiliza tempo médio entre falhas (TMEF – em inglês Mean Time Between Failures, MTBF), o TMEF é definido pelo inverso da taxa de falhas multiplicado pelo número de equipamentos e o período, como podemos ver na equação 1 (Bloch; Budris, 2010).

$$TMEF: (N_{eq} \cdot P)/\lambda \quad (1)$$

Sendo:

N_{eq} – Número de equipamentos

P – Período

λ - Número de Falhas/Intervenções

2.2 BOMBAS

São máquinas acionadas que recebem energia de uma fonte motora, transformam em energia cinética e energia de pressão e a transmitem ao fluido bombeado. A utilização de bombas ocorre sempre que se necessita aumentar a pressão de um fluido, transportá-lo pela tubulação de ponto a outro de uma planta, seguindo as condições de vazão e pressão estabelecidas pelo processo. Existem diversos tipos de bombas, cada uma adequada a uma determinada condição que o processo exige, porém, as bombas mais utilizadas na indústria sucroalcooleira são bombas centrífugas, também conhecidas como bombas dinâmicas centrífugas ou turbo-bombas (FERREIRA; RODRIGUES, 2002).

2.2.1 BOMBAS CENTRIFUGAS

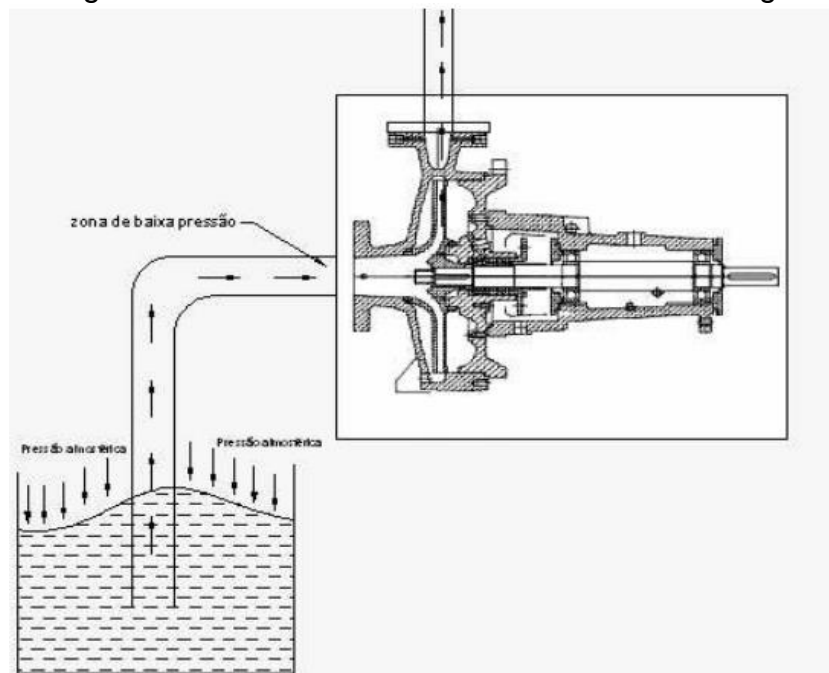
Em bombas centrífugas, a energia é transferida ao fluido pela rotação do eixo onde é montado o rotor, com um certo número de pás ou palhetas. A geometria do rotor e suas palhetas caracteriza o tipo da bomba centrífuga e influencia a forma como a energia é transferida ao fluido e sua direção na saída do rotor. A vazão da bomba depende de suas características construtivas e das características do sistema onde ela está operando (MACINTYRE, 1997).

2.2.1.1 FUNCIONAMENTO DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

O funcionamento da bomba centrífuga baseia-se, praticamente, na criação de uma zona de baixa pressão e de uma zona de alta pressão. Para o funcionamento, é necessário que a carcaça esteja completamente cheia de líquido, e portanto, que o rotor esteja mergulhado no líquido. Devido à rotação do rotor, comunicada por uma fonte

externa de energia (geralmente um motor elétrico), o líquido que se encontra entre as palhetas no interior do rotor é arrastado do centro para a periferia pelo efeito da força centrífuga. Produz-se assim uma depressão interna ao rotor, o que acarreta um fluxo vindo através da conexão de sucção. O líquido impulsionado sai do rotor pela sua periferia, em alta velocidade e é lançado na carcaça que contorna o rotor. Na carcaça grande parte da energia cinética do líquido (energia de velocidade) é transformada em energia de pressão durante a sua trajetória para a boca de recalque. Faz-se necessária essa transformação de energia porque as velocidades do líquido na saída do rotor, seriam prejudiciais às tubulações de recalque, e também, porque a energia de velocidade pode ser facilmente dissipada por choques nas conexões e peças das canalizações de recalque (MACINTYRE, 1997). A figura 1 representa o funcionamento de uma bomba centrífuga.

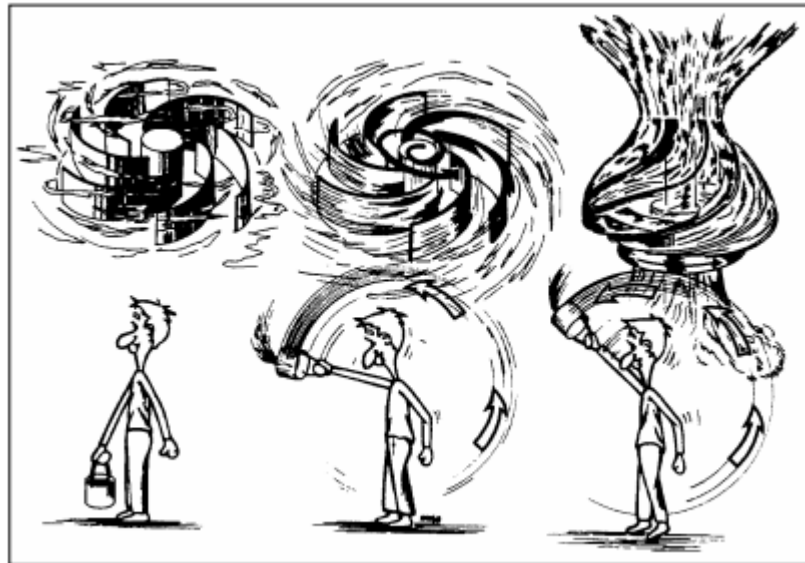
Figura 1 - Funcionamento de uma bomba centrífuga



Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

Uma maneira simples de explicar como age a força centrífuga, esta apresentada na figura 2, onde ocorre o seguinte: Quando giramos um balde contendo água acima de uma certa velocidade, a água não cai. A força que mantém a água no balde é a força centrífuga.

Figura 2 - Ação da força centrífuga



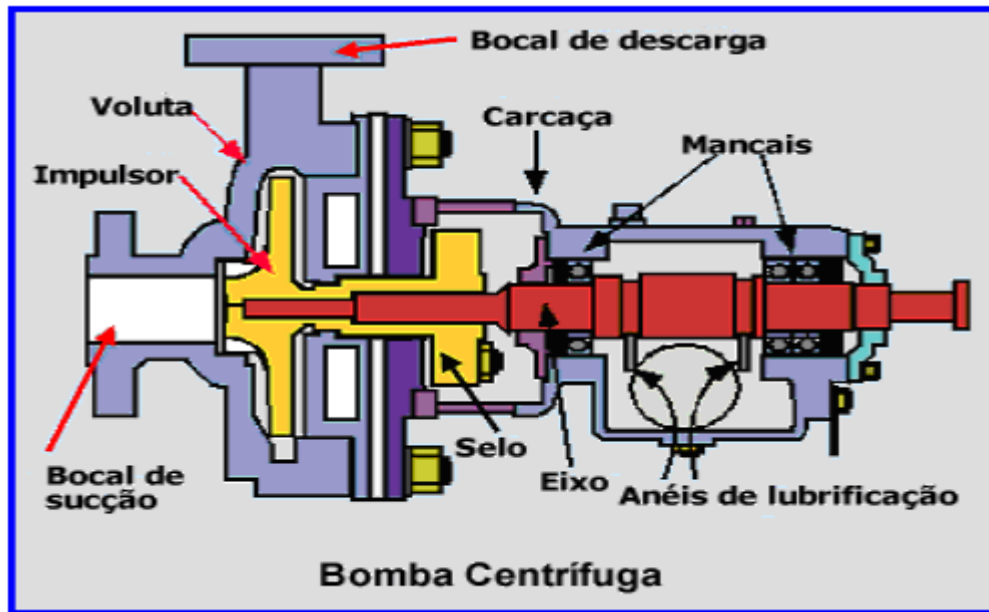
Fonte:(LIMA, 2003)

2.2.1.2 COMPONENTES DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

Os principais componentes de uma bomba centrífuga são: Rotor, Corpo espiral, difusor (em bombas mult-estágio), Eixo, Luva protetora do eixo, Anel cadeado, Anel centrifugador, Anéis de desgaste, Caixa de selagem (gaxetas ou selos mecânicos), Suporte do mancal e mancais.

Podemos ver na figura 3, os componentes pertencentes a uma bomba centrífuga monoestágio.

Figura 3 - Representação de uma bomba centrífuga monoestagio



Fonte: (IMBIL, 2012)

2.2.1.3 CLASSIFICAÇÕES DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Podem ser classificadas segundo diversos critérios, sendo eles;

- 1) Segundo a posição do eixo: Bomba centrífuga horizontal, vertical ou inclinada.
- 2) Segundo ao número de rotores: Simples estágio (um rotor) e multiestágios (vários rotores).
- 3) Segundo a localização: Submersa e não submersa.
- 4) Segundo o sentido do fluxo: Radial, axial ou misto.

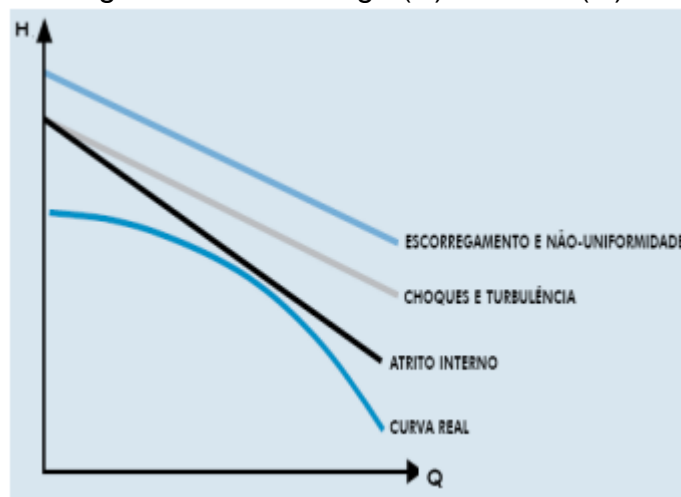
2.2.1.4 CURVAS DE CARGA (H) X VAZÃO (Q)

Teoricamente, a carga de uma bomba centrífuga é definida como energia por unidade de massa que a bomba tem condições de fornecer ao líquido, para uma determinada vazão. Na prática, a carga de uma bomba centrífuga é definida como energia por unidade de peso (força) que a bomba tem condições de fornecer ao líquido, para uma determinada vazão conforme equação 2 (FERREIRA; RODRIGUES, 2002).

$$kgf \cdot \frac{m}{kgf} = m \quad \text{ou} \quad lbf \cdot \frac{ft}{lbf} = ft \quad (2)$$

Diz-se então que é a altura de coluna de líquido (m ou ft) equivalente ao diferencial de pressão que a bomba fornece a uma determinada vazão, ou a altura manométrica que a bomba é capaz de vencer naquela vazão. Como a energia fornecida pelo eixo é constante, quanto maior a vazão, maior a distribuição de energia pela massa de fluido e menor a carga, ou diferencial de pressão conseguida. Na teoria, a carga fornecida ao líquido varia de maneira linear com a vazão fornecendo assim a curva teórica de uma bomba centrífuga. Porém existem diversas perdas de energia hidráulica no processo devido ao comportamento do líquido em relação ao rotor e carcaça não ser o ideal, existem perdas por escorregamento, atrito interno, choques e turbulência (FERREIRA; RODRIGUES, 2002). Dessa forma, na prática, a carga fornecida ao líquido varia de maneira não linear com a vazão, fornecendo assim a curva real de uma bomba centrífuga, conforme figura 4.

Figura 4 - Curva carga (H) x Vazão (Q)



Fonte:(FERREIRA; RODRIGUES, 2003)

2.2.1.5 CURVAS POTÊNCIA ABSORVIDA (POT abs) X VAZÃO(Q)

A potência realmente absorvida pelo líquido, potência útil (Pot u), pode ser definida também em função da massa ou do peso, conforme equações 3 e 4.

$$Pot_u = \rho \cdot Q \cdot H1 \quad (3)$$

$$Pot_u = \gamma Q \cdot H2 \quad (4)$$

Sendo que:

$\rho = \text{Massa específica}$

$\gamma = \text{peso específico}$

$H1 = \text{Energia/massa}$

$H2 = \text{energia/peso}$

A potência absorvida pelo conjunto da bomba (Pot abs) é igual a potência útil somada a todas as perdas de energia no conjunto da bomba, conforme equação 5. Além das perdas hidráulicas (Ph), devemos considerar ainda:

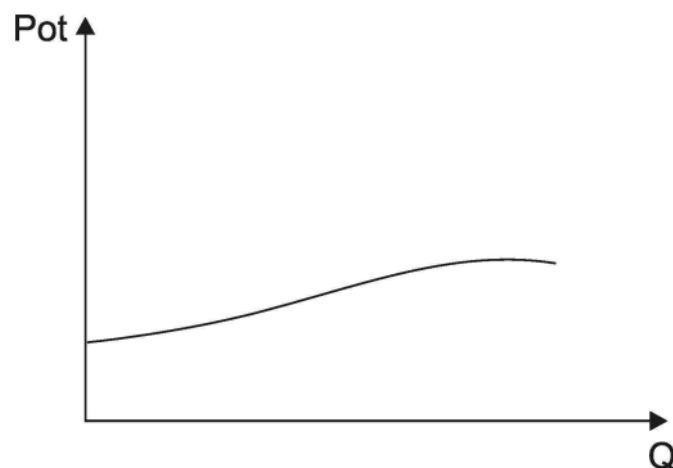
- Perdas volumétricas (Pv): uma parte da energia cedida ao fluido é perdida pela recirculação do líquido nas partes internas da bomba.

- Perdas mecânicas (Pm): uma parte da energia cedida ao fluido é perdida pelo atrito dos componentes mecânicos da bomba, como atrito nos mancais de rolamento e sistema de vedação dos mancais.

$$Pot_{abs} = Pot_u + P_h + P_v + P_m \quad (5)$$

Na prática, não se faz cálculos das perdas volumétricas e perdas mecânicas, a curva de potência absorvida é gerada a partir de testes de bancadas no fabricante da bomba, conforme figura 5 (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991).

Figura 5 - Curva potência absorvida (Pot abs) x vazão (Q).



Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

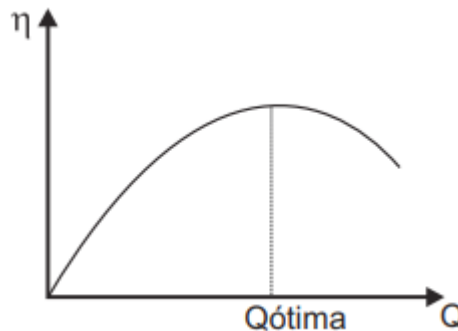
2.2.1.6 CURVAS RENDIMENTOS TOTAL(η) X VAZÃO (Q)

O rendimento da bomba é definido como a relação entre a potência fornecida ao fluido e aquela fornecida pelo motor elétrico à bomba. É fornecida pelo fabricante, conforme curva abaixo, ou calculada conforme fórmula:

$$\eta = \frac{\text{Potência recebida ao fluido}}{\text{Potência recebida do acionador}} \quad (6)$$

Podemos ver na figura 6 a representação gráfica a curva de rendimento.

Figura 6 - Curvas Rendimentos Total(η) x Vazão (Q)



Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

2.2.1.7 CURVAS NPSH REQ (NPSH req) X VAZÃO (Q)

As bombas centrífugas necessitam de líquido na sucção para operarem de forma satisfatória, dessa forma deve existir uma certa pressão na sucção da bomba. Em testes de bancada no fabricante das bombas é definido um valor de pressão líquida positiva na sucção (em inglês Net Positive Suction Head – NPSH). O NPSH requerido para uma bomba centrífuga varia com a vazão, sendo assim os fabricantes efetuam testes de bancada a fim de gerar a curva NPSH req. x Vazão(Q).

2.2.2 FATORES QUE ALTERAM AS CURVAS CARACTERÍSTICAS

São alterações na geometria da bomba, no acionamento ou no fluido que alteram seu desempenho e conseqüentemente suas curvas características, passando de uma condição atual (1) para uma nova condição (2).

2.2.2.1 VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO ROTOR

Refere-se à troca do rotor ou a usinagem do diâmetro externo do rotor a fim de reduzi-lo, sendo limitados pelo tamanho da carcaça e pela baixa eficiência para rotores pequenos (folga muita grande entre rotor e carcaça e conseqüentemente muita recirculação). Essas variações podem ser calculadas através das equações 7 e 8. O motivo da variação do diâmetro do rotor é a adequação da curva característica de um determinado modelo de bomba ao ponto de trabalho, visto que para cada modelo de bomba centrífuga existe uma família de rotores com diâmetros variados (MACINTYRE, 1997).

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (7)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (8)$$

Outras mudanças geométricas no rotor têm influência mais complexa nas curvas características e seu desgaste devido ao tempo de uso pode reduzir sua eficiência.

2.2.2.2 VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO DO ROTOR

Relaciona-se à variação da rotação do seu acionador, pode ser variação da rotação de uma turbina a vapor, controlando a vazão de vapor para a turbina, como a variação de rotação de um motor elétrico através de inversor de frequência (MACINTYRE, 1997). Essas variações podem ser utilizadas para controlar o desempenho de uma bomba centrífuga em um sistema, conforme as equações 9, 10 e 11. Com a alteração da rotação do rotor se alteram as curvas de carga (H) x vazão (Q) da bomba, a fim de adequar a capacidade da bomba à necessidade do sistema de bombeamento.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (9)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (10)$$

$$\sqrt{\frac{Pot_2}{Pot_1}} = \sqrt[3]{\frac{N_2}{N_1}} \quad (11)$$

2.2.2.3 VARIAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

A variação da massa específica não altera a carga da bomba, ou seja, a energia cedida por unidade de massa de fluido continuará a mesma. Porém a potência absorvida pela bomba é diretamente proporcional, conforme equação 12.

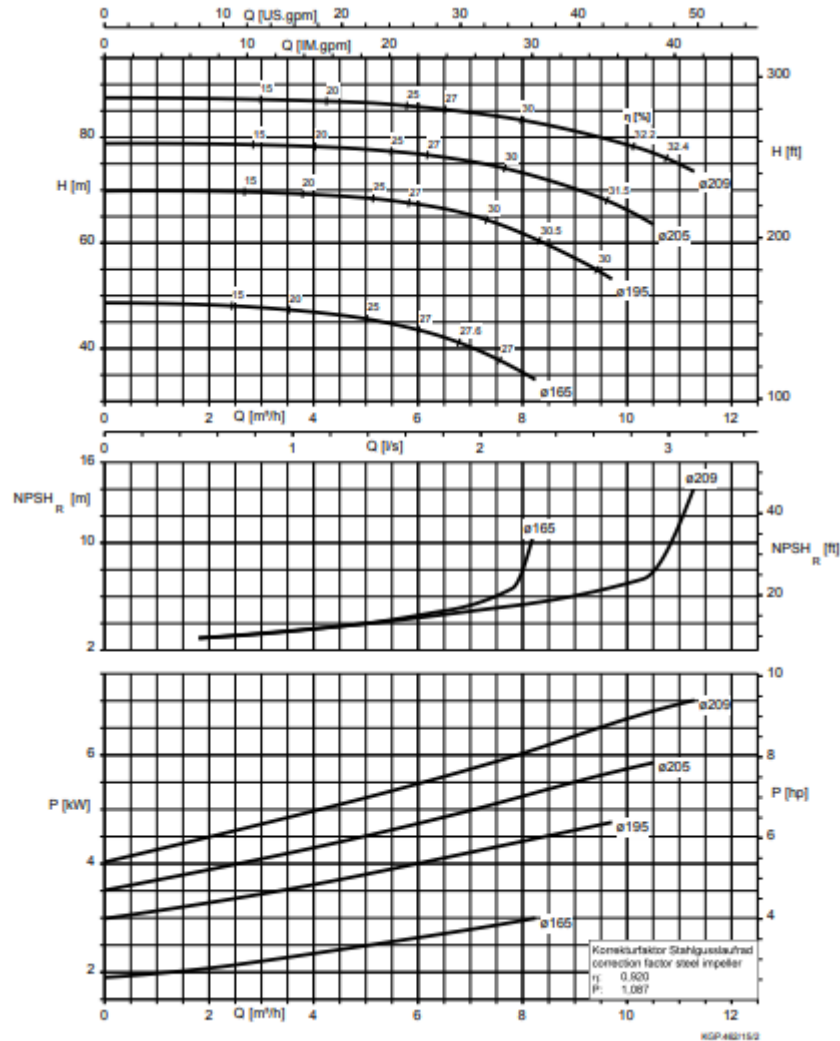
$$Pot_u = \rho \cdot Q \cdot H \quad (12)$$

Com fluidos muito viscosos as bombas centrífugas aumentam muito a potência absorvida, reduzem a carga e diminuem um pouco a vazão bombeada, existem cartas de correções para esses casos.

2.2.3 APRESENTAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas de carga (H) x vazão (Q), potência absorvida (Pot abs) x vazão (Q), rendimento total (n) x vazão (Q) e pressão líquida positiva na sucção (NPSH req) x vazão (Q), são fornecidas pelo fabricante da bomba em um único gráfico, em relação a um único eixo de vazão, com valores para diversos tamanhos de rotor (FERREIRA; RODRIGUES, 2003). Em alguns casos, potência e rendimentos são apresentados em conjuntos de linhas que marcam faixa de valores (linhas de isotência e isorendimento), conforme figura 7.

Figura 7 - Curvas características apresentadas pelo fabricante

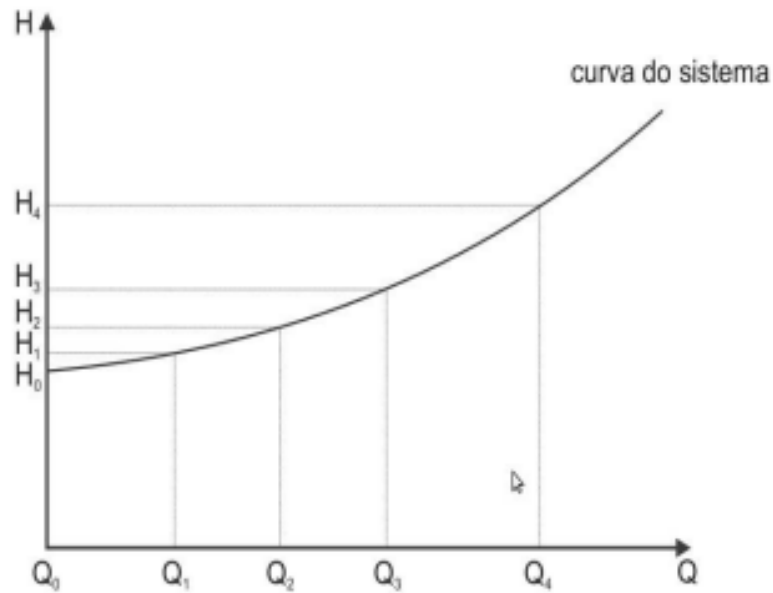


Fonte:(KSB, 2013)

2.2.4 CURVA DO SISTEMA

Em um sistema de bombeamento é necessário determinar qual é a energia por unidade de massa que o sistema solicitará a uma determinada vazão. Na prática se utiliza energia por unidade de peso, chegando à carga do sistema em metros (m) ou altura manométrica total (AMT). A energia por unidade de peso solicitada pelo sistema, e para cada vazão, função da altura estática de elevação do fluido, da diferença de pressão entre a sucção e a descarga, e das perdas existentes no circuito. São essas diferenças e perdas de carga que a bomba deve compensar (FERREIRA; RODRIGUES, 2003). A variação da energia por unidade de peso que o sistema solicita em função da vazão é mostrada pela curva do sistema, conforme figura 8.

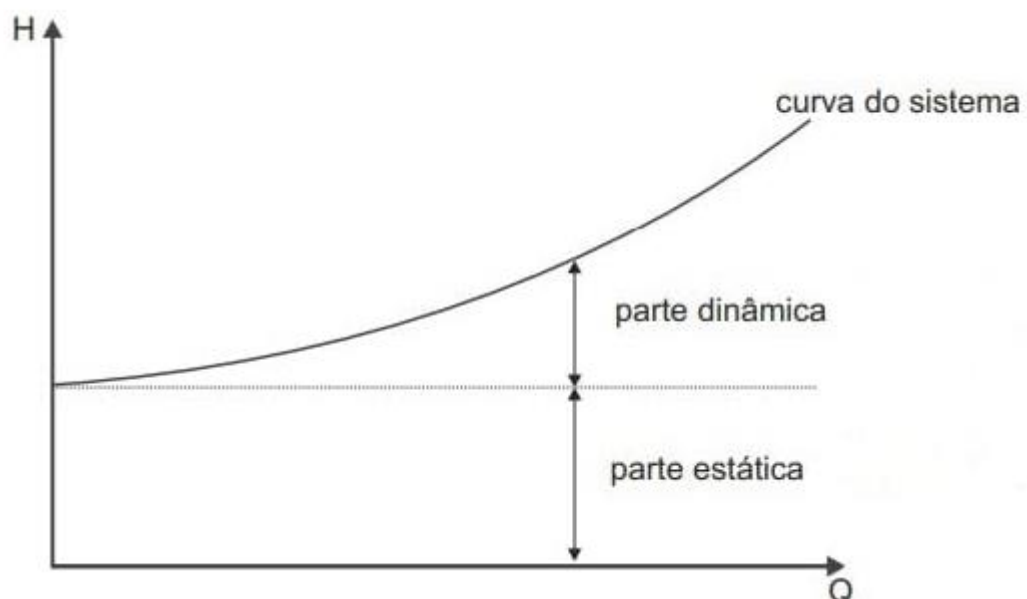
Figura 8 - Curva do sistema



Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

A curva característica de um sistema de bombeamento apresenta duas partes distintas, ou seja, a parte estática e a parte dinâmica. A que corresponde à altura estática, independe da vazão do sistema, ou seja, a carga de pressão nos reservatórios de descarga e sucção e a altura geométrica. A que corresponde à altura dinâmica, ou seja, com o fluido em movimento, gerando carga de velocidade nos reservatórios de descarga e sucção e as perdas de carga, que aumenta com o quadrado da vazão do sistema, conforme figura 9.

Figura 9 - Parte estática e dinâmica na curva do sistema



Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

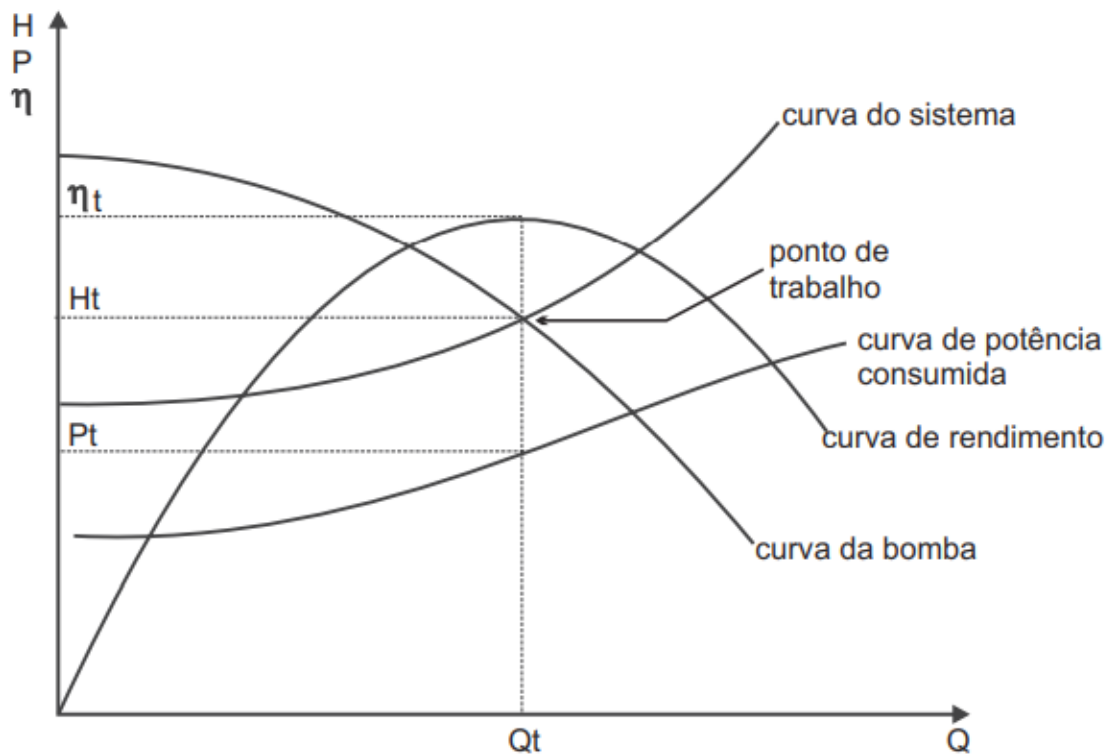
2.2.4.1 FATORES QUE ALTERAM A CURVA DO SISTEMA

Várias mudanças no sistema podem alterar sua curva característica, como: Mudança nas propriedades dos fluidos; Diminuição na densidade reduz o peso das colunas de líquido e altera os valores de perda de carga; Aumento da viscosidade aumenta a perda de carga; Variação dos níveis dos vasos de sucção e descarga; Variação de pressão nos vasos de sucção e descarga; Alteração nas linhas: aumento ou redução da restrição à passagem do líquido, principalmente por válvulas de controle, aumenta ou reduz a perda de carga. (MACINTYRE, 1997).

2.2.5 DETERMINAÇÃO DO PONTO DE TRABALHO

Se plotarmos a curva do sistema no mesmo gráfico onde estão as curvas características das bombas, obteremos o ponto normal de trabalho na intersecção destas curvas, conforme figura 10.

Figura 10 - Ponto de trabalho



Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

Esse ponto de trabalho indica a altura manométrica total (AMT), a vazão, o rendimento e a potência absorvida. A reta vertical também cruza a curva de NPSH requerido e disponível. Recomenda-se que a diferença entre o disponível e o requerido seja no mínimo 0,6m. (MACINTYRE, 1997).

2.2.6 NPSH

Um dos mais polêmicos termos associados com bombas é o NPSH. A compreensão deste conceito é essencial para a correta seleção de uma bomba. A fim de caracterizar as condições para que ocorra boa "aspiração", foi introduzida na terminologia de instalações de bombeamento a noção de NPSH. Esta grandeza representa a disponibilidade de energia com que o líquido penetra na boca de entrada da bomba. O termo NPSH é um termo encontrado em publicações na língua inglesa. Em publicações em vários idiomas, conservou-se a designação NPSH, embora alguns autores utilizem o termo APLS "Altura Positiva Líquida de Sucção" ou "Altura de Sucção Absoluta"(MACINTYRE, 1997).

Para efeito de estudo e definição, o NPSH pode ser dividido em NPSH requerido e NPSH disponível.

2.2.6.1 NPSH DISPONÍVEL

É uma característica da instalação em que a bomba opera, e da pressão disponível do líquido no lado de sucção da bomba.

O NPSH disponível pode ser calculado através de duas fórmulas da fórmula representada na equação 13.

$$NPSH_{disp} = \frac{Prs + Patm - pv}{\gamma} \times 10 \pm H_{geos} - H_p \quad (13)$$

Sendo;

Prs = pressão no reservatório de sucção (kgf/cm²)

Patm = pressão atmosférica local (kgf/cm²)

Pv = pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento (kgf/cm²)

Hgeos = altura geométrica de sucção (positiva ou negativa) (m)

Hp = perdas de carga na sucção (m)

γ = peso específico do fluido na temperatura de bombeamento (kgf/dm³)
 10 = fator para acerto de unidades

Já o NPSH disponível de operação, pode ser calculado conforme equação 14.

$$NPSH_{disp} = \frac{P_s + P_{atm} - p_v}{\gamma} \times 10 + \frac{v_s^2}{2g} + Z_s \quad (14)$$

Sendo:

P_s = pressão no flange de sucção (kgf/cm²)

P_{atm} = pressão atmosférica local (kgf/cm²)

P_v = pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento (kgf/cm²)

γ = peso específico do fluido na temperatura de bombeamento (kgf/dm³)

V_s = velocidade do fluxo no flange de sucção (m/s)

10 = fator para acerto de unidades

Z_s = distância entre as linhas de centro da bomba e do manômetro (m)

G = aceleração da gravidade (m/s²)

2.2.6.2 NPSH REQUERIDO

A maioria das curvas características das bombas incluem a curva do NPSH requerido em função da vazão. Esta curva é uma característica própria da bomba e a rigor pode somente ser obtida experimentalmente nas bancadas de teste dos fabricantes. A expressão NPSH representa a energia em altura absoluta do líquido na sucção da bomba acima da pressão de vapor deste líquido, na temperatura de bombeamento, referida à linha de centro da bomba. Portanto, o fim prático do NPSH é impor limitações às condições de sucção da bomba, de modo a manter a pressão na entrada do rotor acima da pressão de vapor do líquido bombeado. A pressão mais baixa ocorre na entrada do rotor, portanto, se mantivermos a pressão na entrada do rotor superior à pressão de vapor, não teremos vaporização na entrada da bomba e evitaremos assim o fenômeno da cavitação (MACINTYRE, 1997). O fabricante define, deste modo, as limitações de sucção de uma bomba mediante a curva de NPSH requerido. Para definição do NPSH requerido de uma bomba, é utilizado como critério a ocorrência de uma queda de 3% na altura manométrica para uma determinada vazão.

Este critério é adotado pelo Hydraulic Institute Standards e American Petroleum Institute (API 610). Desde que a energia disponível iguale ou exceda os valores de NPSH requerido, não haverá vaporização do líquido, o que evitará a cavitação e as respectivas consequências, deste modo, a bomba deve ser selecionada observando a seguinte relação:

$$NPSH_{disponivel} > NPSH_{requerido}$$

Utiliza-se na prática, que a margem entre o NPSHreq e o NPSHdisp, deve ser no mínimo de 10 a 15 %, porém não inferior que 0,5m (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991). Assim sendo, para aplicação prática, os valores de NPSH requerido informados pelo fabricante, são baseados no seguinte:

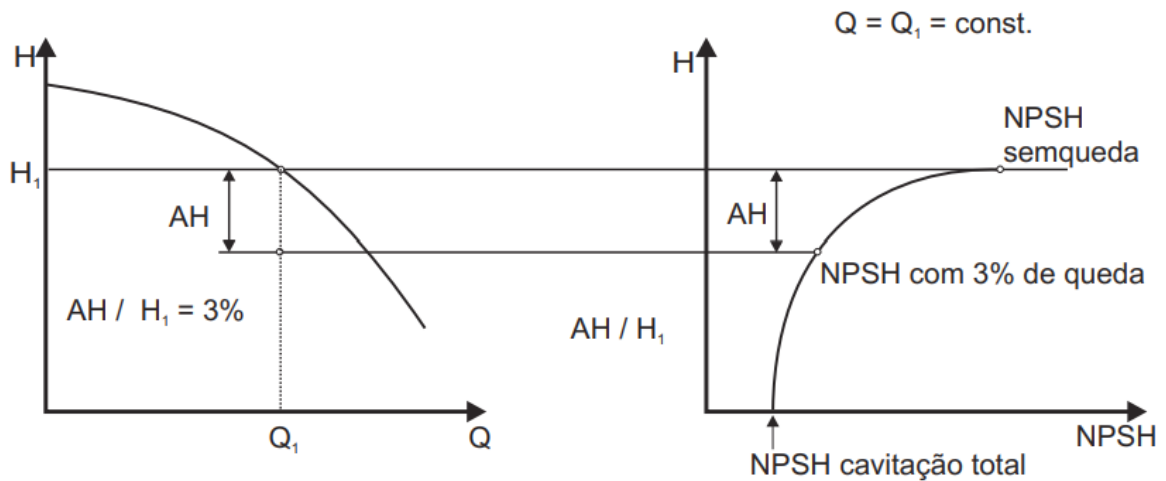
- Na queda de pressão, desde o flange de sucção até a pá do rotor: Como o diâmetro nominal do flange de sucção é normalmente desconhecido na fase de negociação, esta queda de pressão inclui a altura de velocidade no flange de sucção da bomba. A queda de pressão do flange até o rotor não é só perda de carga por atrito, mas é constituída na maior parte pela transformação da pressão em energia cinética (LIMA, 2003).

- Na linha de centro da bomba: Tal prática facilita os estudos de ante-projeto e de comparação entre diversos tipos de bombas, pois existem bombas com flanges de sucção em diversas posições, por exemplo: lateral, axial, etc(LIMA, 2003).

2.2.6.2.1 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO NPSH REQUERIDO

Na figura 11, temos a representação gráfica do NPSH requerido, em relação ao gráfico H X Q e de H X NPSH.

Figura 11 - Representação gráfica do NPSH requerido



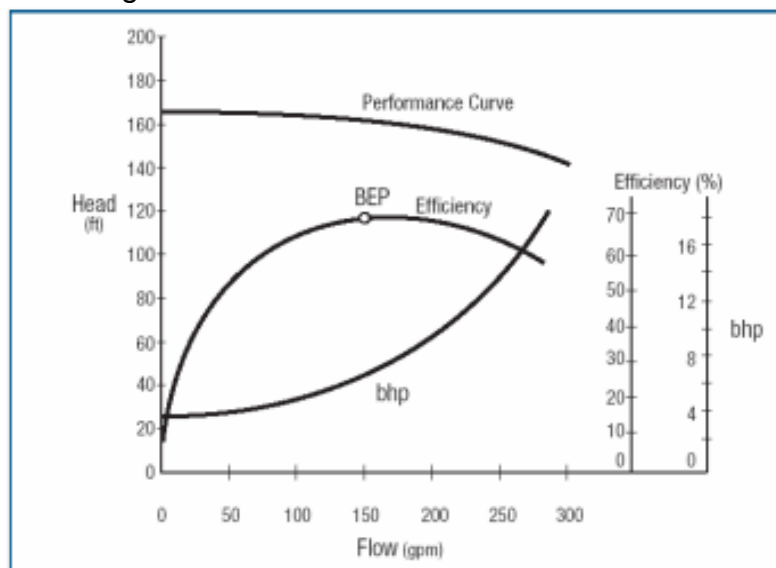
Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

2.2.7 PONTO DE MELHOR EFICIÊNCIA (BEP - BEST EFFICIENCY POINT).

O gráfico da figura 12 mostra a curva característica para uma bomba específica incluindo o ponto de melhor eficiência - BEP. A vazão na qual a bomba converte a energia de entrada (proveniente do acionador) em energia hidráulica de saída de forma mais eficiente é 150gpm, conhecido como BEP. A maioria das bombas centrífugas de simples estágios tem o ponto de melhor eficiência localizada em torno de 70% a 85% da vazão máxima (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991).

O ponto de melhor eficiência para essa bomba está a uma vazão de 150gpm, contra a resistência de 160 pés, com 70% de eficiência.

Figura 12 - Ponto de melhor eficiência BEP



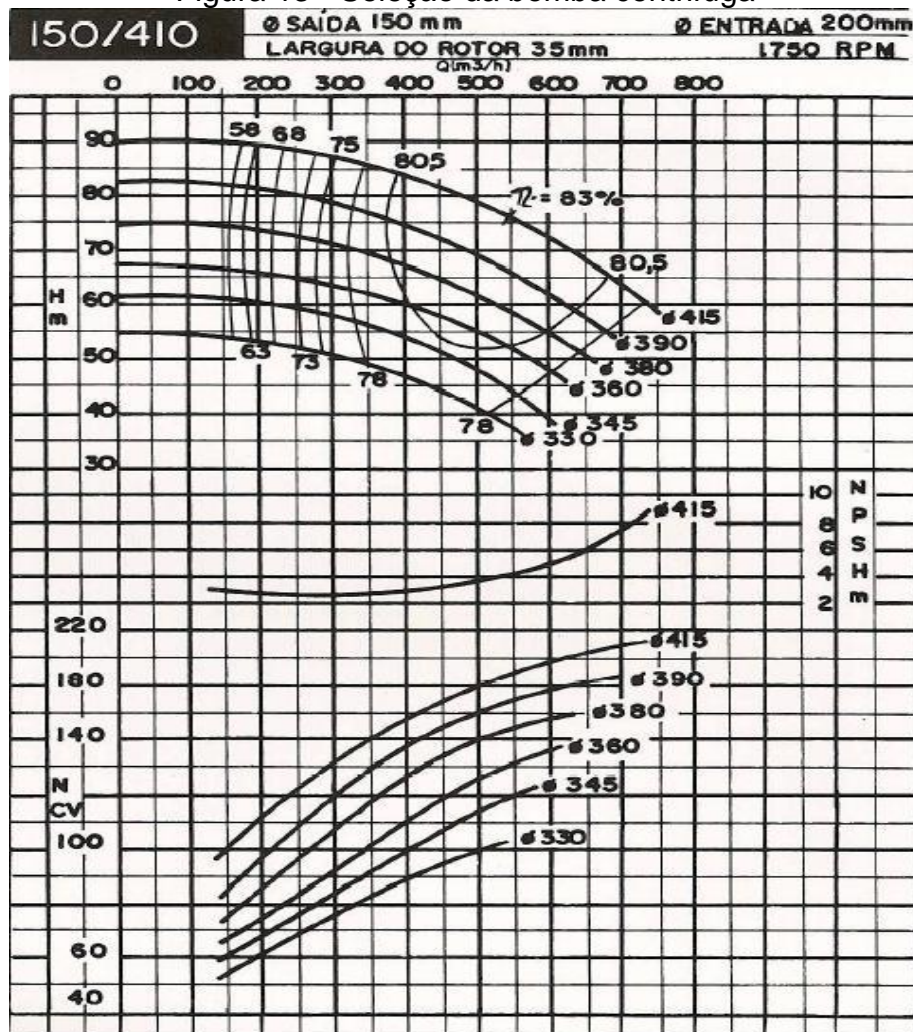
Fonte: (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991)

Para bombas centrífugas de simples voluta, as forças hidráulicas ao redor do rotor quando operando próximo a vazão do BEP, estão quase balanceadas resultando na mais alta eficiência, menor flexão radial do eixo e conseqüentemente menor vibração. Em vazões abaixo ou acima do BEP, as forças hidráulicas ao redor do rotor estão menos balanceadas, resultando em menor eficiência, altos níveis de deflexão do eixo e conseqüentemente maior vibração.

2.2.8 SELEÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Inicialmente, definem-se as condições operacionais necessárias para um sistema de bombeamento, como vazão, pressão de sucção, pressão de descarga, altura manométrica total, produto bombeado, densidade, temperatura, viscosidade e etc. Após a definição das condições operacionais, é gerada a curva do sistema, levando em consideração a altura manométrica total estática, e adicionando a altura manométrica total dinâmica de acordo com o acréscimo da vazão, essa está relacionada com a perda de carga. De posse dessas informações, seleciona-se o modelo da bomba em uma carta de seleção de bombas conforme figura 13. Depois de definido o modelo, define-se o diâmetro do rotor, o NPSH requerido e a potência para a bomba operar no sistema definido (LENGSFELD; DUARTE; ALTIER, 1991). A norma ASNI/HI 9.6.3 de 2017 do HIDRAULIC INSTITUTE, referente a bombas centrífugas para processos, recomenda que a bomba selecionada opere na faixa de 70% a 120% da vazão do BEP, evitando assim problemas relacionados à recirculação interna e esforços radiais maiores.

Figura 13 - Seleção da bomba centrífuga



Fonte: (KSB, 2013)

2.2.9 OPERAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Bombas centrífugas podem operar sozinhas, quando apenas uma bomba atende a características de altura manométrica de recalque (AMT) e vazão desejada. Dentre as razões que conduzem a necessidade de associarmos bombas citamos (MACINTYRE, 1997):

- a) a inexistência, no mercado, de bombas que possam, isoladamente, atender a vazão necessária;
- b) aumento escalonado de vazões com o correr do tempo;
- c) inexistência no mercado de bombas capazes de vencer a altura manométrica de projeto.

As razões (a) e (b) requerem a associação em paralelo, que consiste em fazer duas ou mais bombas recalcarem em uma ou mais linhas comuns, de forma que cada bomba recalque uma parte da vazão.

Para satisfazer a razão (c) é necessária a associação em série. Neste caso as bombas recalcam em linha comum, de tal forma que a anterior, bombeia para a sucção da posterior, que recebe o fluido com maior quantidade de energia de pressão.

2.2.9.1 BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERANDO EM SÉRIE

A opção de operação com bombas centrífugas operando em série se dá quando a altura manométrica de recalque (AMT) não pode ser atingida por uma única bomba a uma determinada vazão. A curva carga (H) x vazão (Q) resultante é a soma das alturas manométricas de recalque (AMT – H) das duas bombas para a mesma vazão conforme figura 14 (MACINTYRE, 1997).

Figura 14 - Curva de bombas centrífugas operando em série

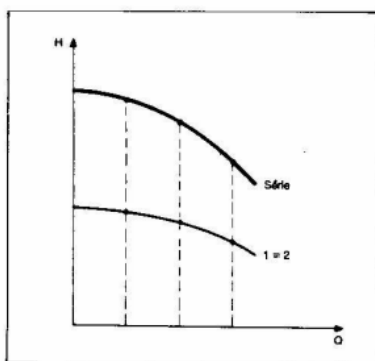


Fig. 16.3 – Bombas iguais

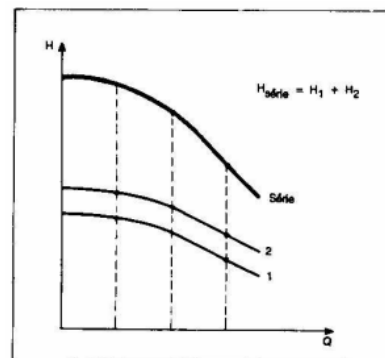
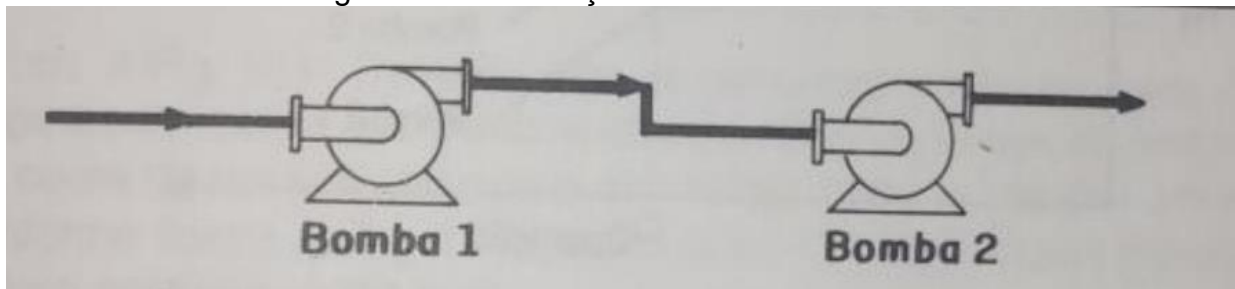


Fig. 16.2 – Bombas diferentes

Fonte: (MACINTYRE, 1997)

Esse tipo de associação é muito utilizado em oleodutos conforme figura 15, onde se necessita transportar produtos a longas distâncias, nesses sistemas a perda de carga é muito elevada devido à longa distância.

Figura 15 - Associação de bombas em serie



Fonte: (FONSECA, 2019)

2.2.9.2 BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERANDO EM PARALELO

A opção por bombas centrífugas operando em paralelo, se dá quando a vazão esperada por um sistema a uma determinada altura manométrica de recalque (AMT) não pode ser atingida por uma única bomba, ou quando em um sistema a vazão pode variar significativamente, nesse segundo caso, a utilização de bombas centrífugas operando em paralelo, flexibiliza a operação desse sistema (MACINTYRE, 1997).

A operação de sistemas de bombeamento com bombas centrífugas operando em paralelo pode oferecer flexibilidade e segurança operacional, visto que a falha de uma bomba apenas diminui a vazão de um sistema de bombeamento não o parando como um todo. A curva carga (H) x vazão (Q) resultante para bombas centrífugas operando em paralelo é a soma das vazões das duas bombas para a mesmas alturas manométricas de recalque (AMT – H), conforme figura 16.

Figura 16 - Curvas de bombas centrífugas operando em paralelo

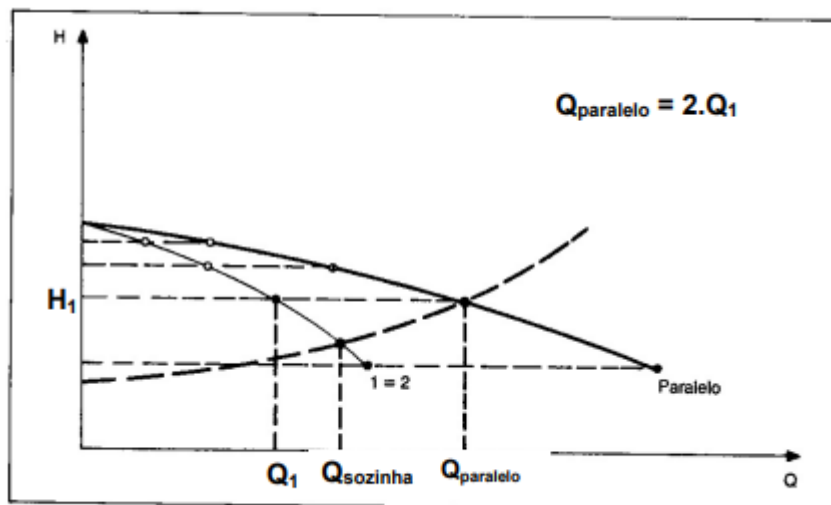


Fig. 16.9 - Associação de bombas iguais com curvas estáveis.

Fonte: (FONSECA, 2019)

A utilização de bombas centrífugas iguais em paralelo é muito comum na indústria Sucroalcooleira, visando manter o sistema operacional a todo momento, onde caso uma das bombas apresente falhas, o processo não para devido a outra bomba.

No caso de utilização de duas bombas centrífugas diferentes em paralelo, deve-se ter cautela, pois dependendo do ponto de trabalho, definido pelo sistema, uma das bombas pode operar com vazão muito baixa, o que é muito prejudicial ao equipamento. Não se recomenda à operação de bombas centrífugas diferentes em paralelo.

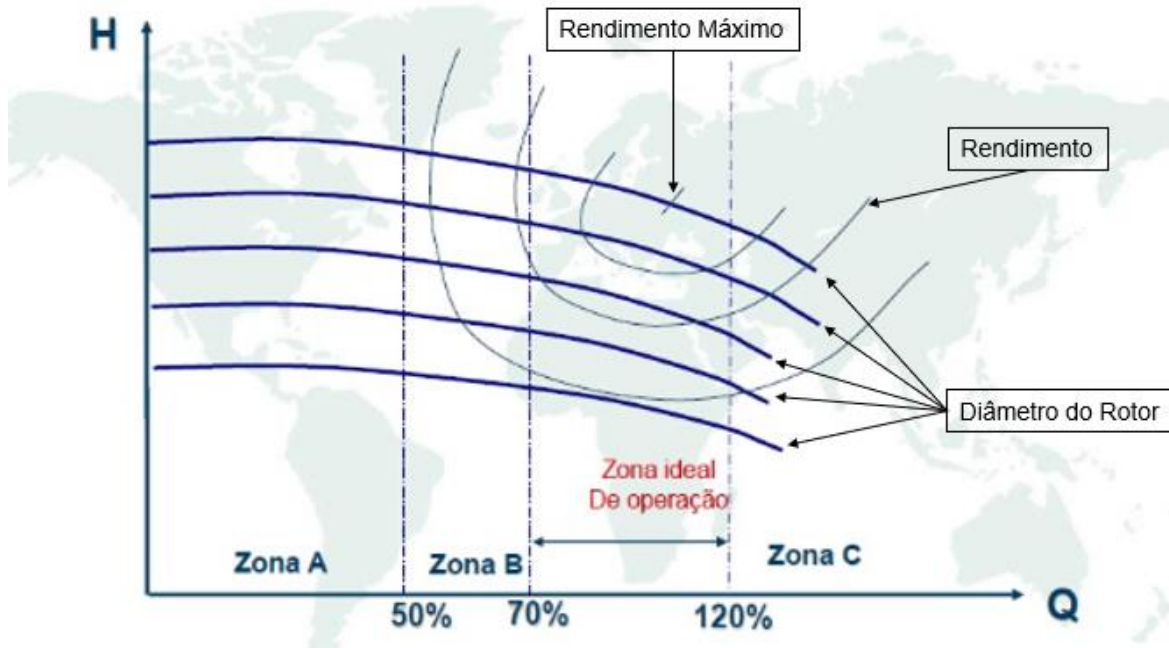
2.2.10 PROBLEMAS RELACIONADOS A BOMBAS CENTRÍFUGAS

Bombas centrífugas podem apresentar vários problemas como, vazamentos, vibração, cavitação, ruído, aquecimento excessivo, perda de eficiência etc. A causa desses problemas podem ser variadas. Basicamente, podemos dividir as causas de falhas de bombas centrífugas como sendo: falha no projeto da bomba, falha na montagem e/ou manutenção e condição operacional inadequada.

Problemas relacionados à condição operacional inadequada podem ser relacionados principalmente à vazão de trabalho da bomba centrífuga. Uma bomba centrífuga é projetada para trabalhar a uma vazão determinada, essa vazão determina o BEP da bomba. Bombas centrífugas operando próximo à vazão do ponto de melhor eficiência apresentam menos falhas relacionadas à condição operacional. A operação de bombas centrífugas a vazões abaixo e acima da vazão de melhor eficiência pode ser a causa de falhas de bombas centrífugas.

A norma ASNI/HI 9.6.3 de 2017 do HIDRAULIC INSTITUTE, referente a bombas centrífugas, recomenda a operação de bombas centrífugas dentro de uma faixa de vazão adequada, essa faixa compreende o valor de 70% a 120% da vazão do BEP, conforme figura 17.

Figura 17 - Limite operacional



Fonte: (IMBIL, 2012)

A figura 18 apresenta alguns dos problemas acarretados na bomba centrífuga ao operar fora da região ideal de operação.

Figura 18 - Operação fora da região ideal



Fonte: (IMBIL, 2012)

2.2.10.1 PROBLEMAS RELACIONADOS A VAZÃO FORA DO BEP

2.2.10.1.1 CAVITAÇÃO POR FALTA DE NPSH DISPONÍVEL

Para entendermos o fenômeno da cavitação é necessário entender inicialmente pressão de vapor de um certo fluido. A pressão de vapor é a pressão exercida por um vapor quando este está em equilíbrio com o líquido que lhe deu origem. A pressão de vapor é uma medida da tendência de evaporação de um líquido. Quanto maior a sua pressão de vapor, maior é essa tendência e mais volátil é o líquido. Se a pressão absoluta de um sistema de bombeamento atingir valor igual ou inferior à pressão do vapor líquido, na temperatura de bombeamento, parte deste líquido se vaporizará. Caso a parte vaporizada encontre alguma região onde a pressão absoluta seja maior que a pressão do vapor líquido na temperatura de bombeamento, haverá colapso das bolhas com retorno à fase líquida e a geração de ondas de choque, esse fenômeno é conhecido como cavitação, gerando vibrações, ruídos e danos à bomba centrífuga.

Ao operar uma bomba centrífuga com a vazão acima da faixa tolerável, 120% do B.E.P, a altura líquida positiva de sucção disponível (NPSHd. – Net Positive Suction Head) deve ser maior, pois a velocidade na sucção do rotor irá aumentar o que diminui a pressão de sucção. Essa diminuição de pressão pode atingir a pressão de vapor do líquido bombeado, causando a cavitação.

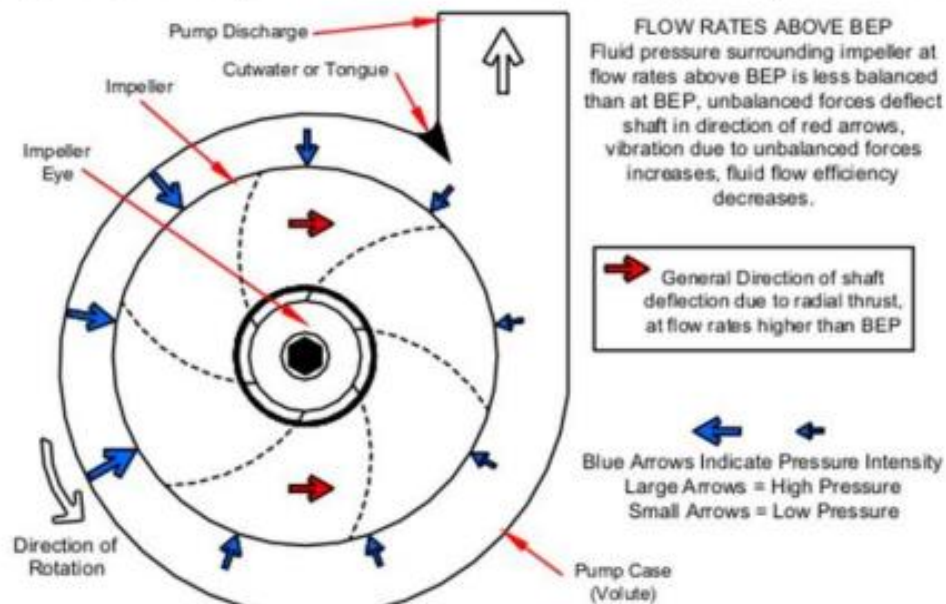
2.2.10.1.2 VIDA REDUZIDA DE MANCAL E SELO MECÂNICO

Em bombas centrífugas de simples voluta operando em vazões acima do BEP, o balanceamento das pressões internas na voluta é irregular, causando deflexões no eixo e conseqüentemente vibrações. Essas vibrações afetam a vida dos mancais e selos mecânicos. Esse problema também é causado quando se opera bombas centrífugas em vazões abaixo do BEP.

Os esforços resultantes em bombas operando fora do BEP podem ser vistos na figura 19.

Figura 19 - Ilustração dos esforços radiais em bombas centrífugas de simples voluta.

Single Volute Pump - Direction of Radial Thrust Operating Above BEP



Fonte: (IRRIGATION CRAFT, 2018)

2.2.10.2 PROBLEMAS RELACIONADOS À VAZÃO ABAIXO DO BEP

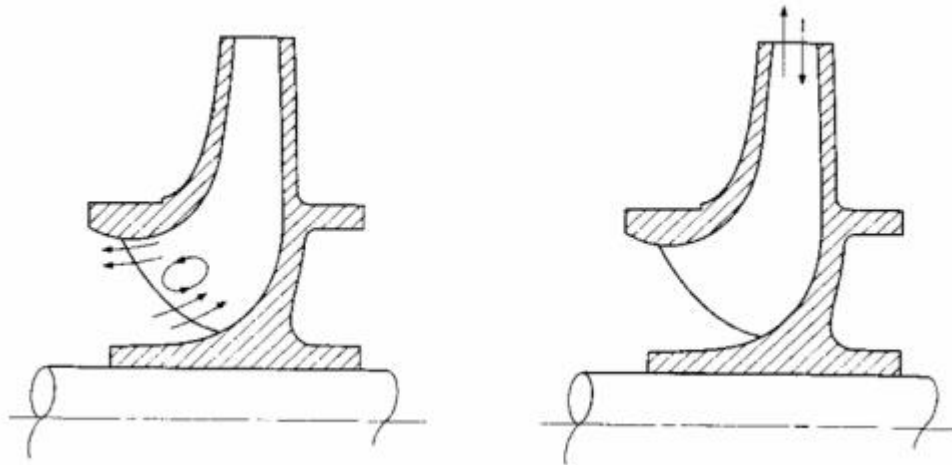
2.2.10.2.1 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA

A vazões muito baixas, a vazão de fluido através da bomba não é suficiente para remover o calor da energia gerado internamente na bomba, esse aumento de temperatura resulta em expansão térmica que pode causar atritos internos entre partes metálicas, e conseqüentemente alta vibração.

2.2.10.2.2 RECIRCULAÇÃO

Outros problemas que causam danos similares ao da cavitação são a recirculação na sucção e na descarga. A recirculação na sucção causa danos semelhantes à da cavitação por falta de NPSHd, porém a causa desse problema não está relacionada com falta de NPSHd e sim com bombas centrífugas operando a vazões muito baixas onde ocorre à recirculação do fluido bombeado pela sucção. Essa recirculação cria vórtices que causam danos ao rotor, conforme figura 20.

Figura 20 - Ilustração da recirculação no rotor



Fonte:(MACINTYRE, 1997)

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 HISTÓRICO DE FALHAS

A metodologia experimental se desenvolveu no levantamento do histórico de falhas das bombas centrífugas no setor de tratamento de caldo na usina sucroalcooleira Univalem de Valparaíso-SP, no período de 01/01/2018 até 30/04/2023.

Todas as falhas de bombas centrífugas são registradas no sistema SAP, através da abertura de uma OM (ordem de manutenção), feita imediatamente após detecção da falha. As OMs acarretam um relatório de manutenção, que visa manter um histórico das falhas do equipamento, a fim de aplicar métodos que diminuam as mesmas.

As bombas que apresentam maiores taxas de falhas são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 - Histórico de falhas das bombas centrífugas que mais falharam

TAG do Posto	TMEF Posto (meses)	TAG da BBA	TMEF (meses)	TAG	Data abertura da OM	Sintoma
TC-FE1-BB	5,77	TC-FE1-BB01	4,81	TC-FE1-BB01	15/04/2018	Vibração alta
				TC-FE1-BB01	23/09/2018	Vibração alta
				TC-FE1-BB01	13/10/2018	Vazamento Selagem
				TC-FE1-BB01	04/08/2019	Vazamento Selagem
				TC-FE1-BB01	08/03/2021	Vazamento Selagem
				TC-FE1-BB01	06/07/2021	Vibração alta
				TC-FE1-BB01	09/09/2021	Vazamento Selagem
				TC-FE1-BB01	22/06/2022	Cavitação
				TC-FE1-BB01	07/09/2022	Vazamento Selagem
		TC-FE1-BB02	7,2	TC-FE1-BB02	23/05/2018	Vazamento Selagem
				TC-FE1-BB02	14/10/2018	Vazamento Selagem
				TC-FE1-BB02	01/05/2019	vibração alta
				TC-FE1-BB02	08/09/2019	Vazamento Selagem
				TC-FE1-BB02	05/07/2021	Vazamento Selagem
TC-FE1-BB02	18/07/2022			Vibração alta		
TC-FP1-BB	7,86	TC-FP1-BB01	8,65	TC-FP1-BB01	05/06/2019	Vibração alta
				TC-FP1-BB01	01/05/2021	Vazamento Selagem
				TC-FP1-BB01	26/09/2021	Baixo rendimento/ vazão
				TC-FP1-BB01	28/08/2022	Vazamento Selagem
				TC-FP1-BB01	09/10/2022	Vazamento Selagem
		TC-FP1-BB02	7,21	TC-FP1-BB02	08/10/2018	Vazamento Selagem
				TC-FP1-BB02	17/06/2019	Vibração alta
				TC-FP1-BB02	24/04/2021	Cavitação
				TC-FP1-BB02	30/09/2021	Vazamento Selagem
				TC-FP1-BB02	16/07/2022	Vazamento Selagem
TC-FR1-BB	7,21	TC-FR1-BB01	6,18	TC-FR1-BB01	14/06/2018	Vazamento Selagem
				TC-FR1-BB01	10/10/2018	Vazamento Selagem
				TC-FR1-BB01	08/07/2019	Vibração alta
				TC-FR1-BB01	18/05/2021	Vibração alta
				TC-FR1-BB01	07/10/2021	Vazamento Selagem
				TC-FR1-BB01	18/06/2022	Baixo rendimento/ vazão
				TC-FR1-BB01	27/09/2022	Vazamento Selagem
		TC-FR1-BB02	8,65	TC-FR1-BB02	14/06/2019	Vazamento Selagem
				TC-FR1-BB02	15/06/2021	Vazamento selagem
				TC-FR1-BB02	05/09/2021	Aquecimento
				TC-FR1-BB02	16/10/2021	Vazamento Selagem
TC-FR1-BB02	19/09/2022	Vibração alta				

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em contrapartida temos bombas que apresentaram poucas falhas nos últimos 5 anos, sendo apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 - Histórico de falhas das bombas centrífugas que menos falharam

TAG do Posto	TMEF Posto (meses)	TAG da BBA	TMEF (meses)	TAG	Data abertura da OM	Sintoma
TC-FA1-BB	28,84	TC-FA1-BB01	43,27	TC-FA1-BB01	15/05/2019	Vibração alta
		TC-FA1-BB02	21,63	TC-FA1-BB02	23/05/2018	Vazamento Selagem
				TC-FA1-BB02	01/10/2019	Vibração alta
TC-FM1-BB	43,27	TC-FM1-BB01	43,27	TC-FM1-BB01	01/04/2018	Vibração alta
		TC-FM1-BB02	43,27	TC-FM1-BB02	27/04/2019	Vazamento Selagem
TC-FQ1-BB	28,84	TC-FQ1-BB01	21,63	TC-FQ1-BB01	30/06/2018	Vazamento Selagem
				TC-FQ1-BB01	18/07/2021	Vazamento Selagem
		TC-FQ1-BB02	43,27	TC-FQ1-BB02	23/10/2018	Vibração alta

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Após o levantamento do histórico de falhas das bombas centrífugas no setor de tratamento de caldo na usina Univalem, as bombas foram classificadas como, bombas de baixa confiabilidade conforme tabela 1, e bombas de alta confiabilidade conforme tabela 2.

Tabela 1 - Bombas de baixa Confiabilidade

TAG BBA	T.M.E.F (meses)	Ultima Falha
TC-FE1-BB01	4,81	07/09/2022
TC-FE1-BB02	7,21	18/07/2022
TC-FP1-BB01	8,65	09/10/2022
TC-FP1-BB02	7,21	30/10/2022
TC-FR1-BB01	6,18	27/09/2022
TC-FR1-BB02	8,65	19/09/2022

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 2 - Bombas de alta Confiabilidade

TAG BBA	T.M.E.F (meses)	Ultima Falha
TC-FA1-BB01	43,27	15/05/2019
TC-FA1-BB02	21,63	01/10/2019
TC-FM1-BB01	43,27	01/04/2018
TC-FM1-BB02	43,27	27/04/2019
TC-FQ1-BB01	21,63	18/07/2021
TC-FQ1-BB02	43,27	23/10/2018

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 DADOS DO PROJETO

Após a classificação inicial das bombas centrífugas conforme tabelas 1 e 2, foram verificados dados de projeto dessas bombas conforme tabela 3 e 4.

Tabela 3 - Dados de projeto das Bombas centrífugas de baixa confiabilidade

TAG da Bomba	Pot. Acion. (cv)	Vazão Projeto (m³/dia)	Head Proj. (m)	Rend. Proj. (%)	Rend. BEP. (%)	BEP (m³/dia)	Vazão Máxima (m³/dia)	rpm	Vazão Mínima (m³/dia)
TC-FE1-BB01	20	2880	30	71,5	81	4080	4080	1750	1325
TC-FE1-BB02	20	2880	30	71,5	81	4080	4080	1750	1325
TC-FP1-BB01	75	7200	65	63	84	15600	15600	1750	3540
TC-FP1-BB02	75	7200	65	63	84	15600	15600	1750	3540
TC-FR1-BB01	20	2600	50	59	78	5760	5760	1180	1850
TC-FR1-BB02	20	2600	50	59	78	5760	5760	1180	1850

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 4 - Dados de projeto das Bombas centrífugas de alta confiabilidade

TAG da Bomba	Pot. Acion. (cv)	Vazão Projeto (m³/dia)	Head Proj. (m)	Rend. Proj.(%)	Rend. BEP. (%)	BEP (m³/dia)	Vazão Máxima (m³/dia)	rpm	Vazão Mínima (m³/dia)
TC-FA1-BB01	60	5785	68	73	74	6980	6980	1750	2160
TC-FA1-BB02	60	5785	68	73	74	6980	6980	1750	2160
TC-FM1-BB01	200	5280	190	75	78	7680	7680	3500	1920
TC-FM1-BB02	200	5280	190	75	78	7680	7680	3500	1920
TC-FQ1-BB01	50	9600	35	80	86	13200	13200	1750	3600
TC-FQ1-BB02	50	9600	35	80	86	13200	13200	1750	3600

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 DADOS OPERACIONAIS

Para cada bomba centrífuga foi verificada a existência de instrumentos a fim de medir a vazão de produto bombeado pela mesma, visando comparar a condição operacional com os dados de projeto das bombas. As tabelas 5 e 6 apresentam os instrumentos de indicação de vazão disponíveis em cada bomba.

Tabela 5 - Controle de vazão bombas de baixa confiabilidade

Bombas de Baixa Confiabilidade	Indicador de Vazão
TC-FE1-BB01	FIC3001
TC-FE1-BB02	FIC3002
TC-FP1-BB01	FIC3025
TC-FP1-BB02	FIC3025
TC-FR1-BB01	FIC3029
TC-FR1-BB02	FIC3029

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 6 - Controle de vazão bombas de alta confiabilidade

Bombas de Alta confiabilidade	Indicador de Vazão
TC-FA1-BB01	FIC4012
TC-FA1-BB02	FIC4012
TC-FM1-BB01	FIC4019
TC-FM1-BB02	FIC4019
TC-FQ1-BB01	FIC4024
TC-FQ1-BB02	FIC4024

Fonte: Elaborado pelo Autor

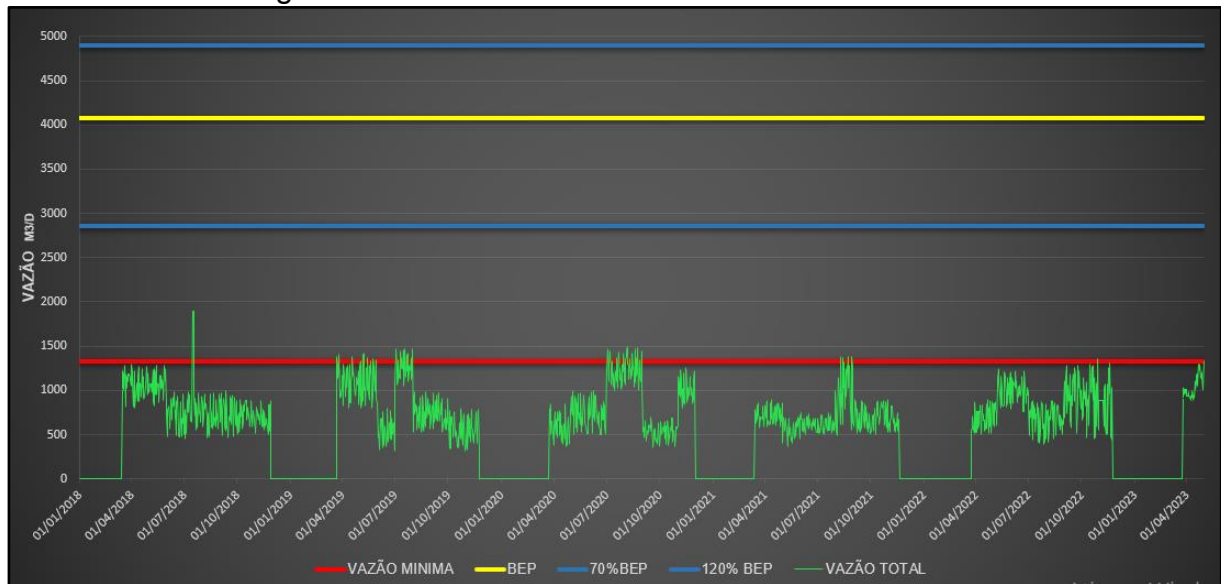
3.5 COMPARATIVOS ENTRE DADOS DE PROJETO/OPERACIONAIS

Após o levantamento dos dados de projeto/operacionais, foi comparada a vazão de projeto com a vazão bombeada no período de 01/01/2018 a 30/04/2023, sendo que devido as paradas de entressafra da unidade, se totalizaram 1298 dias de operação das bombas. Os gráficos de comparação projeto/operacionais das bombas de baixa confiabilidade estão apresentados da seguinte forma: TC-FE1-BB01 conforme figura 21; TC-FE1-BB02 conforme figura 22; TC-FP1-BB01/02 conforme figura 23; TC-FR1-BB01/02 conforme figura 24, e para as bombas de alta confiabilidade: TC-FA1-BB01/02 conforme figura 25, TC-FM1-BB01/02 conforme figura 26 e TC-FQ1-BB01/02 conforme figura 27.

Dos gráficos apresentados nas figuras 21, até a figura 27, a linha amarela mostra a vazão no BEP, as linhas azuis limitam a faixa de operação aceitável de acordo com norma ASNI/HI 9.6.3 de 2017 do HIDRAULIC INSTITUTE, referente a bombas centrífugas, e a linha vermelha defini o limite de vazão mínima da bomba.

Na figura 21, as linhas horizontais representam os limites de vazão para a bomba TC-FE1-BB01. Nota-se que a bomba opera boa parte do tempo abaixo da vazão mínima. A vazão média bombeada no período pela bomba TC-FE1-BB01 foi de 807,89m³/dia, que representa 28,05% da vazão de projeto, e 19,81% da vazão do BEP.

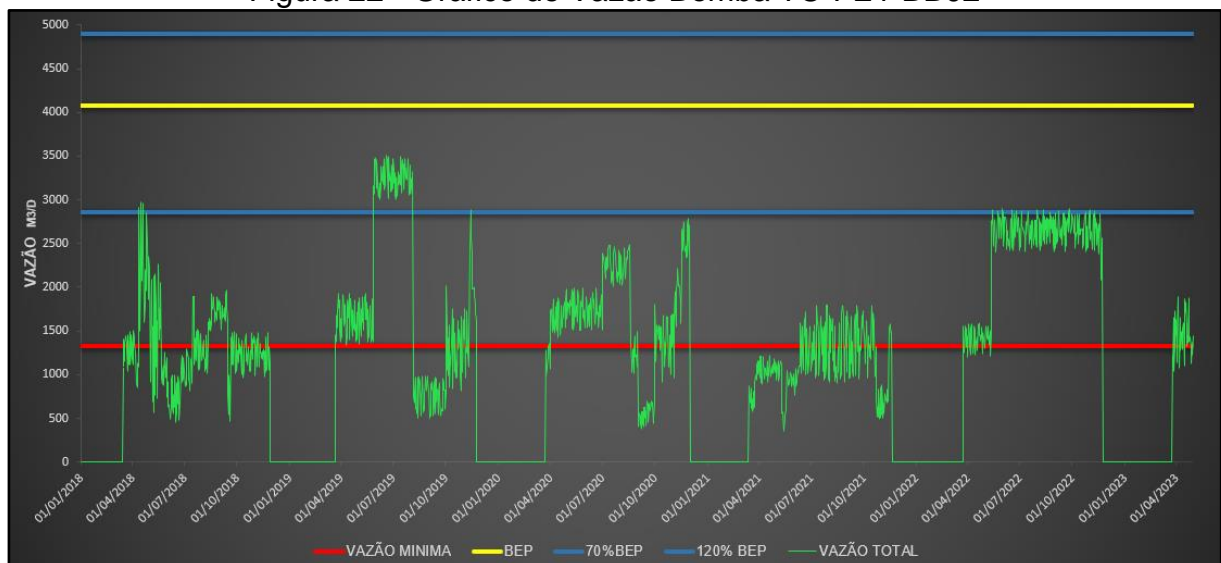
Figura 21 - Gráfico de Vazão Bomba TC-FE1-BB01



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 22, as linhas horizontais representam os limites de vazão para a bomba TC-FE1-BB02. Pela análise da figura, a bomba teve bastante oscilação de vazão, em alguns momentos operando abaixo da linha de vazão mínima, em outros próximo da faixa aceitável e também dentro da faixa aceitável de vazão. A vazão média bombeada no período pela bomba TC-FE1-BB02, foi de 1643,08m³/dia, que representa 57,05% da vazão de projeto e 40,27% da vazão do BEP.

Figura 22 - Gráfico de Vazão Bomba TC-FE1-BB02

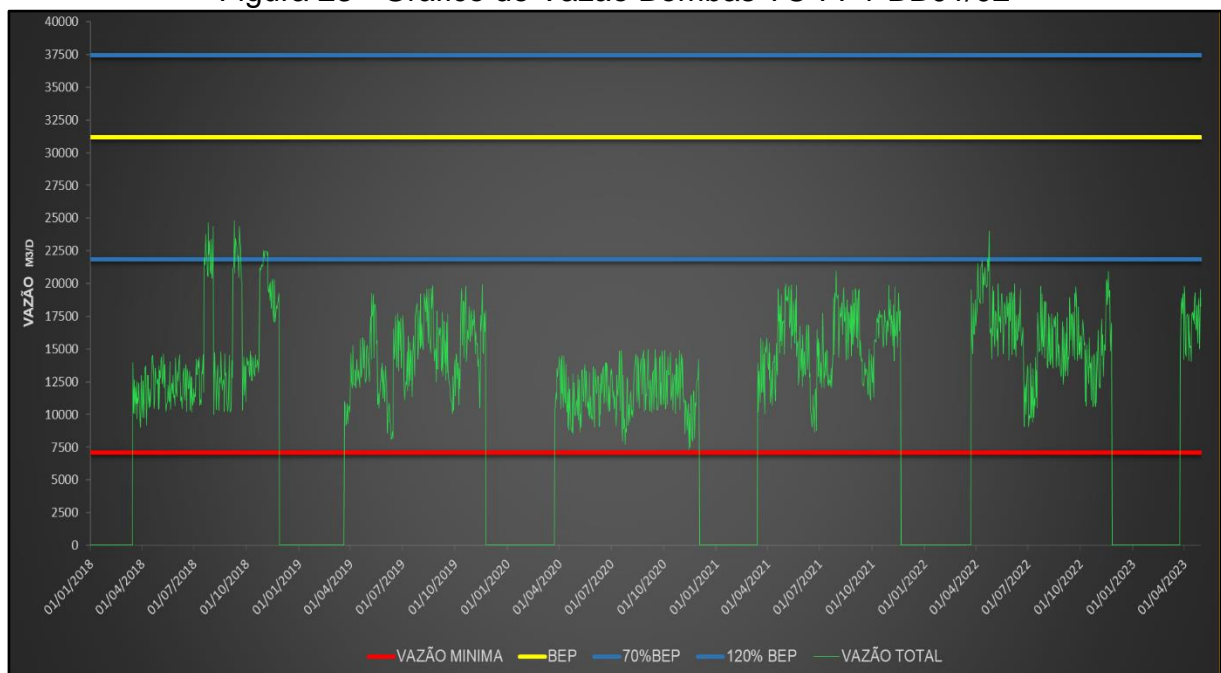


Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 23, as linhas horizontais representam os limites de vazão para as bombas TC-FP1-BB01/02. Pelo gráfico apresentado nesta figura, é possível observar

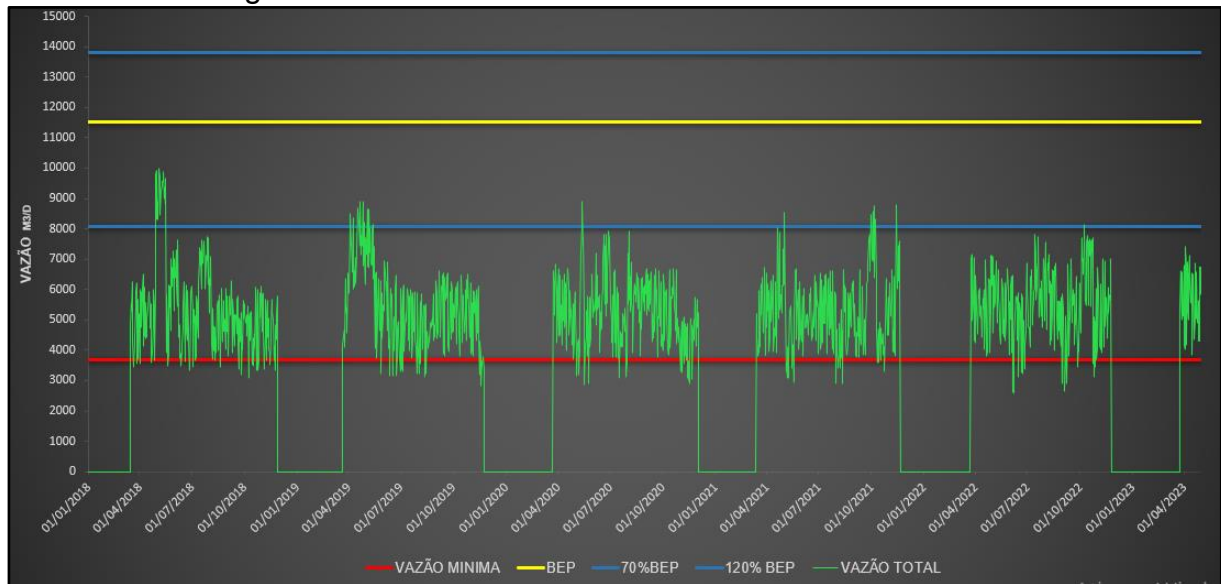
que a vazão destas bombas teve uma alta taxa de variação, ficando em sua grande maioria acima da linha de vazão mínima, porém abaixo da faixa ideal de vazão, e por se tratar de bombas centrífugas operando em paralelo e com a vazão medida por um único instrumento, pode ocorrer que a vazão total não se divide igualmente entre as bombas, devido a desvios operacionais. A vazão média bombeada no período pelas bombas TC-FP1-BB01/02 foi de 13987,8m³/dia, que representa 97,13% da vazão de projeto e 44,83% da vazão do BEP.

Figura 23 - Gráfico de Vazão Bombas TC-FP1-BB01/02



Na figura 24, as linhas horizontais representam os limites de vazão para as bombas TC-FR1-BB01/02. Podemos observar pelo gráfico apresentado na figura 24, que as bombas operaram na maioria do tempo próximo a linha de vazão mínima. Por se tratar de bombas centrífugas operando em paralelo e com a vazão medida por um único instrumento, pode ocorrer que a vazão total não se divide igualmente entre as bombas, devido a desvios operacionais. A média de vazão bombeada no período foi de 5128,36m³/dia, que representa 98,6% da vazão de projeto e 44,52% da vazão do BEP.

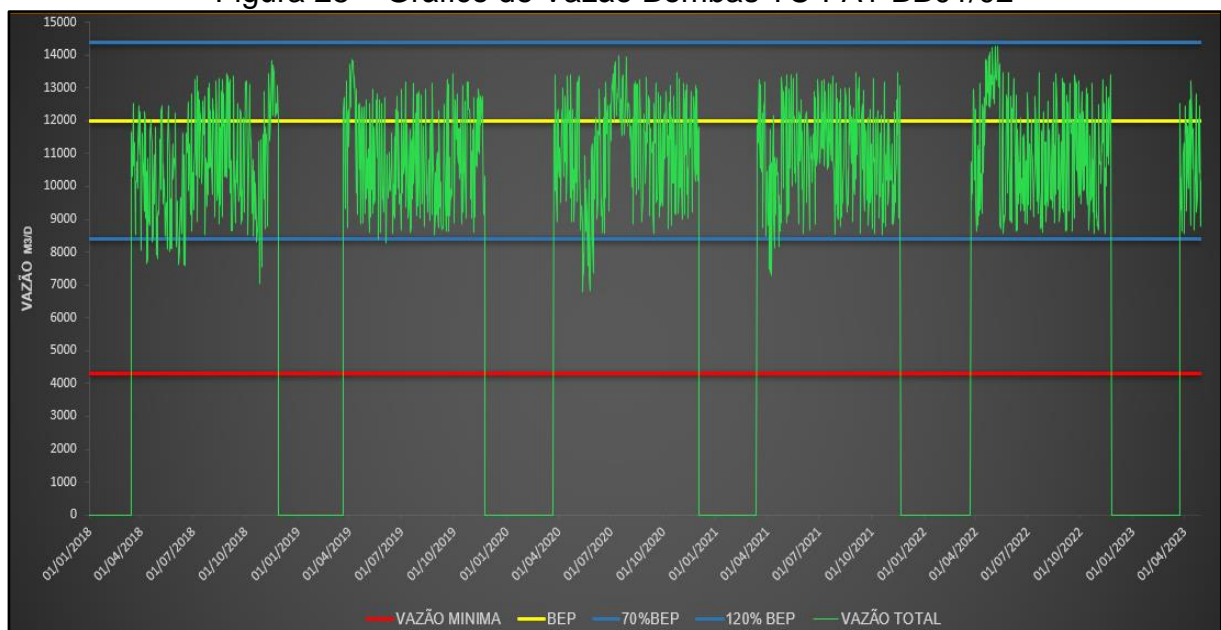
Figura 24 - Gráfico de Vazão Bombas TC-FR1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 25, as linhas horizontais representam os limites de vazão para as bombas TC-FA1-BB01/02. Nota-se que a bomba sempre operou acima da vazão mínima e a maior parte do tempo dentro da faixa aceitável. A vazão média bombeada no período pelas bombas TC-FA1-BB01/02 foi de 11000,23m³/dia, que é 95,07% da vazão de projeto e 78,79 da vazão do BEP.

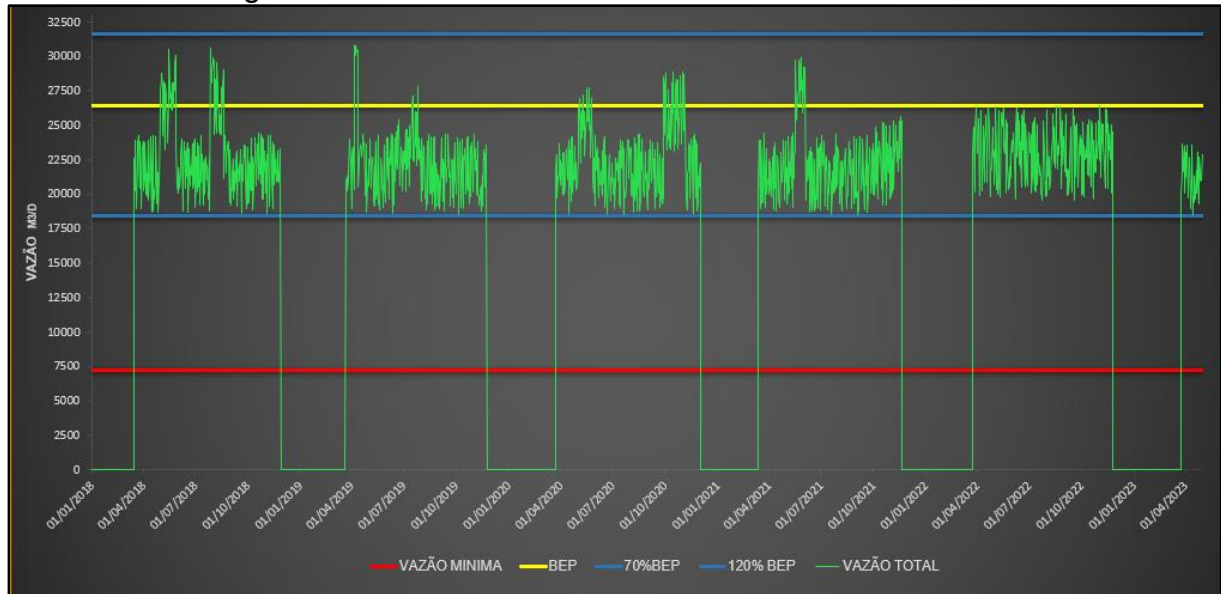
Figura 25 – Gráfico de Vazão Bombas TC-FA1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 26, as linhas horizontais representam os limites de vazão para as bombas TC-FQ1-BB01/02. Nota-se que as bombas sempre operaram acima da vazão mínima, e sempre dentro da faixa ideal de vazão. A vazão média bombeada no período pelas bombas TC-FQ1-BB01/02 foi de 22311,78m³/dia, que representa 116,20% da vazão de projeto e 84,51% da vazão do BEP.

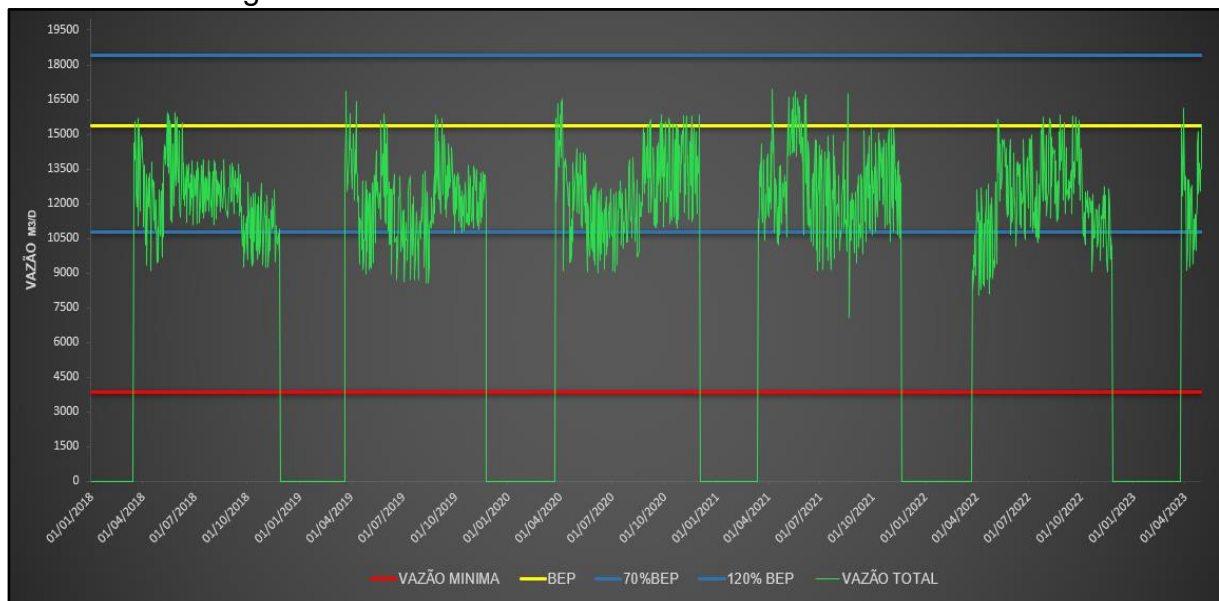
Figura 26 - Gráfico de Vazão Bombas TC-FQ1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na figura 27, as linhas horizontais representam os limites de vazão para as bombas TC-FM1-BB01/02. Analisando o gráfico apresentado na figura 27, as bombas sempre operaram acima da vazão mínima e a maior parte do tempo dentro da faixa aceitável. A vazão média bombeada no período pelas bombas TC-FM1-BB01/02 foi de 11988,12m³/dia, que representa 113,5% da vazão de projeto e 78,04% da vazão do BEP.

Figura 27 - Gráfico de Vazão Bombas TC-FM1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RELAÇÃO ENTRE FALHAS E CONDIÇÃO OPERACIONAL

Após o comparativo entre as vazões de projeto e as vazões operacionais das bombas selecionadas, pode-se relacionar a confiabilidade das bombas com a condição operacional da bomba.

4.1.1 FALHAS X CONDIÇÃO OPERACIONAL - TC-FE1-BB01

Entre as bombas presentes no estudo, a bomba TC-FE1-BB01 foi a que mais falhou, apresentando um TMEF de 4,81 meses. A vazão operacional média no período foi de 19,81% da vazão do BEP. As falhas apresentaram sintomas de vibração alta e vazamento de selagem. A vibração alta é consequência da condição operacional da bomba, que operou com vazão abaixo da vazão mínima, onde ocorre grande recirculação interna e consequentemente aumento da vibração, além do aumento de temperatura. Após análise do sistema de bombeamento, verificou-se que a bomba está superdimensionada. Para este tipo de problema foram levantadas duas propostas de soluções, sendo a troca da bomba por uma que se adeque melhor a essa vazão, trabalhando com maior eficiência, ou a aplicação de um inversor de frequência, a fim de controlar a capacidade do sistema de bombeamento através do controle de rotação da bomba. Analisando o gráfico da figura 21, a vazão não oscilou muito, desta forma a

melhor solução proposta, foi a troca da bomba por uma que opere com maior rendimento dentro desta vazão.

O sintoma vazamento de selagem é consequência da vibração alta causada pela condição operacional da bomba. O selo mecânico montado na bomba TC-FE1-BB01 é um selo duplo montado em componentes, este projeto de selo atual é muito suscetível a falhas em condições adversas do processo, em situações que a bomba opere com vazões reduzidas, aumenta-se assim a pressão interna na bomba. Recomendou-se substituir o selo mecânico atual para um selo cartucho, a fim de suportar condições adversas durante situações em que o equipamento opera com vazões reduzidas.

4.1.2 FALHAS X CONDIÇÃO OPERACIONAL - TC-FE1-BB02

A bomba TC-FE1-BB02 apresentou um TMEF de 7,21 meses. A vazão operacional média no período foi de 40,27% do BEP e com medidas de vibração que chegaram a 8mm/s, bem acima do que os 4,5mm/s permitido pela norma ISO 10816. As falhas apresentaram sintomas de baixo rendimento/vazão e vazamento de selagem, 67% das falhas tiveram como sintomas vazamento de selagem.

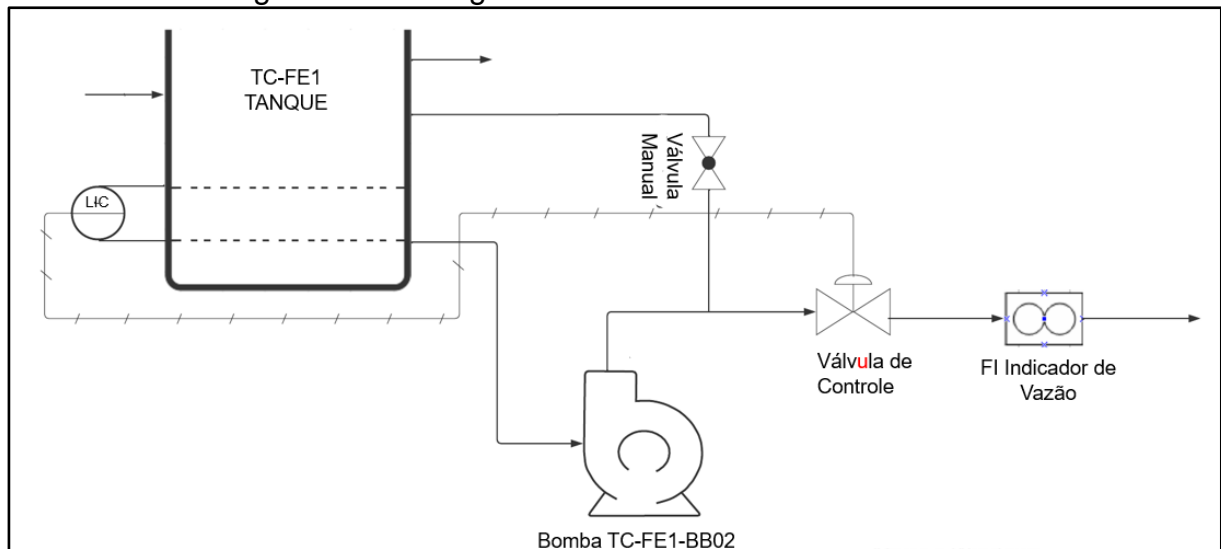
Após a realização de uma análise detalhada do projeto, foi observado que a bomba está trabalhando com a menor medida de rotor disponível para essa carcaça, o que facilita ainda mais a recirculação na sucção da bomba em baixas vazões. Das falhas por vazamento de selagem, foi constatado que além dos problemas gerados pela vibração do equipamento devido a condição operacional, também temos a montagem incorreta do selo mecânico componente, onde ele está sendo montado fora dos parâmetros estabelecidos pelo fabricante, de forma que a pressão na mola, é maior do que a especificada, gerando um desgaste prematuro da vedação. Para solucionar o problema na montagem dos selos, foi proposto a aplicação de um treinamento à equipe de manutenção, visando aprimorar a montagem dos selos. Além disso foi proposto a troca do tipo de material da vedação do selo, de nitrílica para Viton, pois a vedação de nitrílica suporta o fluido com temperatura de até 90°C segundo o fabricante, e a temperatura de trabalho do fluido desta bomba, ultrapassa os 100°C, que pode ser suportado pela vedação de Viton, que segundo o fabricante pode trabalhar com fluidos até 230°C .

A vazão bombeada pela bomba TC-FE1-BB02 é medida por um indicador de vazão individual, garantindo assim uma medida de vazão mais próxima possível do

real. Foi constatada que no período do estudo ocorreu controle de capacidade da bomba através de uma válvula de descarga automática, e uma válvula de recirculação manual, conforme figura 28. Após reavaliar o projeto de bombeamento, foi constatado a possibilidade da troca do rotor da bomba buscando uma melhor eficiência e visando diminuir a recirculação em baixas vazões. Foi proposto também a instalação de um inversor de frequência a fim de controlar a capacidade do sistema de bombeamento através do controle de rotação da bomba.

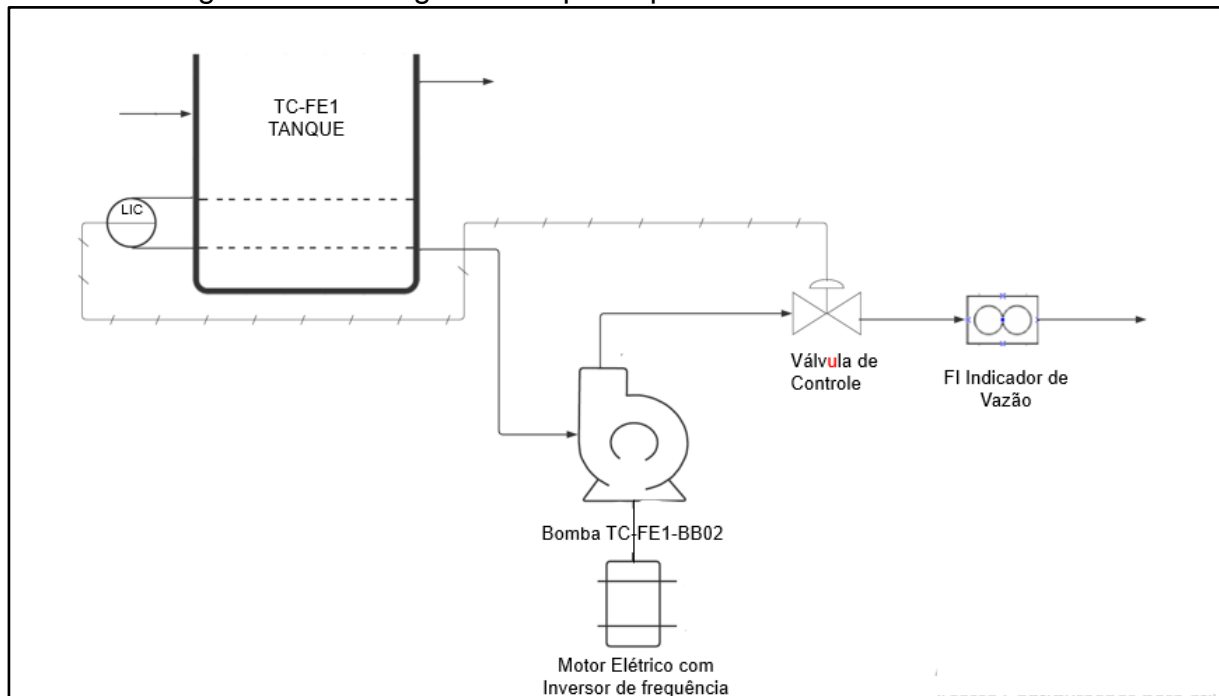
Essa solução trará uma grande economia de energia direta relacionada com a elevação da eficiência da bomba e uma economia indireta relacionada ao aumento da confiabilidade da bomba. A nova montagem do sistema está apresentada na figura 29.

Figura 28 - Fluxograma atual da Bomba TC-FE1-BB02



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 29 - Fluxograma Proposto para a bomba TC-FE1-BB02



Fonte: Elaborado pelo Autor

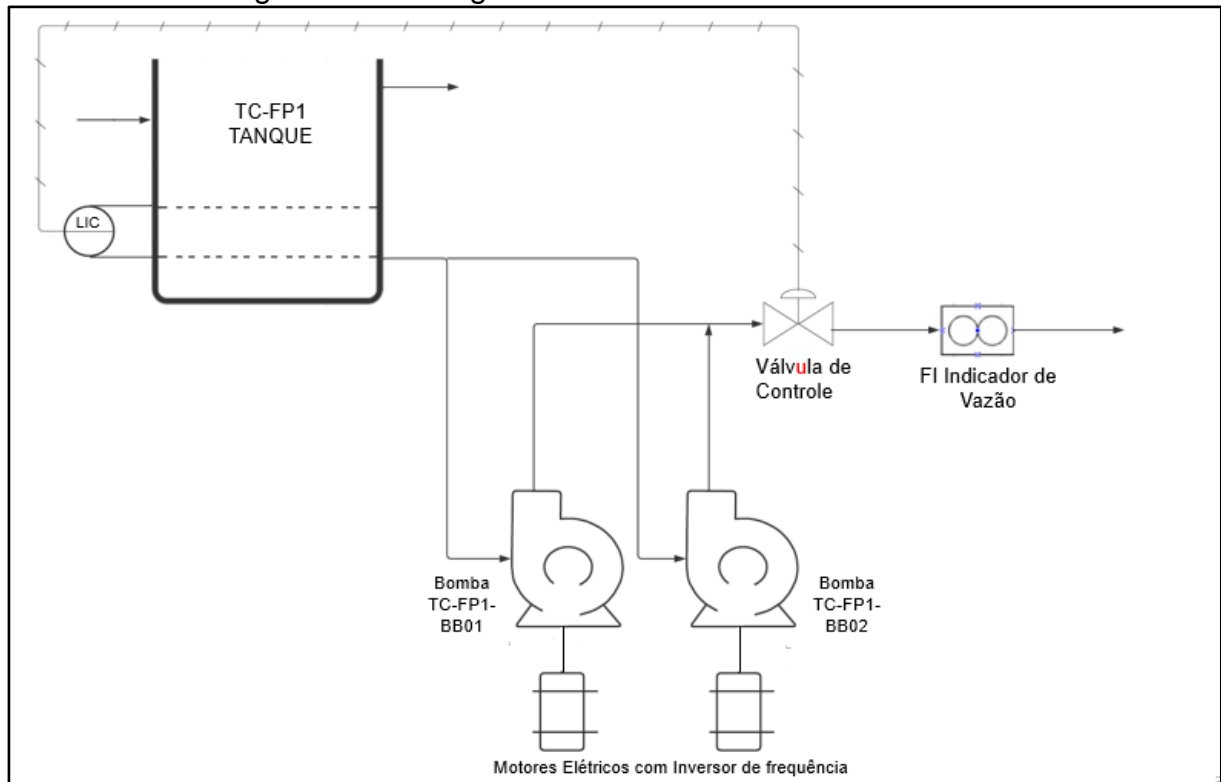
4.1.3 FALHAS X CONDIÇÃO OPERACIONAL - TC-FP1-BB01/02

As bombas TC-FP1-BB01/02, operam em paralelo no posto TC-FP1-BB, e apresentaram um TMEF de 8,65 e 7,21 meses. A vazão operacional média no período em que operaram com duas bombas em paralelo foi de 44,83% da vazão do BEP.

A vazão bombeada pelas bombas TC-FP1-BB01/02 é medida por um único indicador de vazão, o que impede a constatação das vazões das mesmas, de forma individual, não garantindo assim que a vazão total é dividida igualmente entre as duas bombas. Foi constatado que no período do estudo que as bombas, apesar de operarem em paralelo, trabalham com rotações diferentes, isso ocorreu por desconhecimento da operação e na intenção de controlar a vazão na tubulação de recalque das bombas, controlando assim o processo posterior no tratamento de caldo, conforme figura 30. Essa situação de duas bombas operando em paralelo com rotação diferente é prejudicial aos equipamentos, pois a vazão bombeada por cada bomba pode ser muito diferente, de forma que uma das bombas opere próximo da vazão mínima. A solução indicada é o treinamento dos operadores sobre a operação de bombas centrífugas em paralelo, e também a instalação de um indicador de vazão individual para cada bomba, junto com um alarme nas telas do COI, quando as mesmas estiverem operando próximo da vazão mínima, visando um controle melhor da vazão de operação de cada

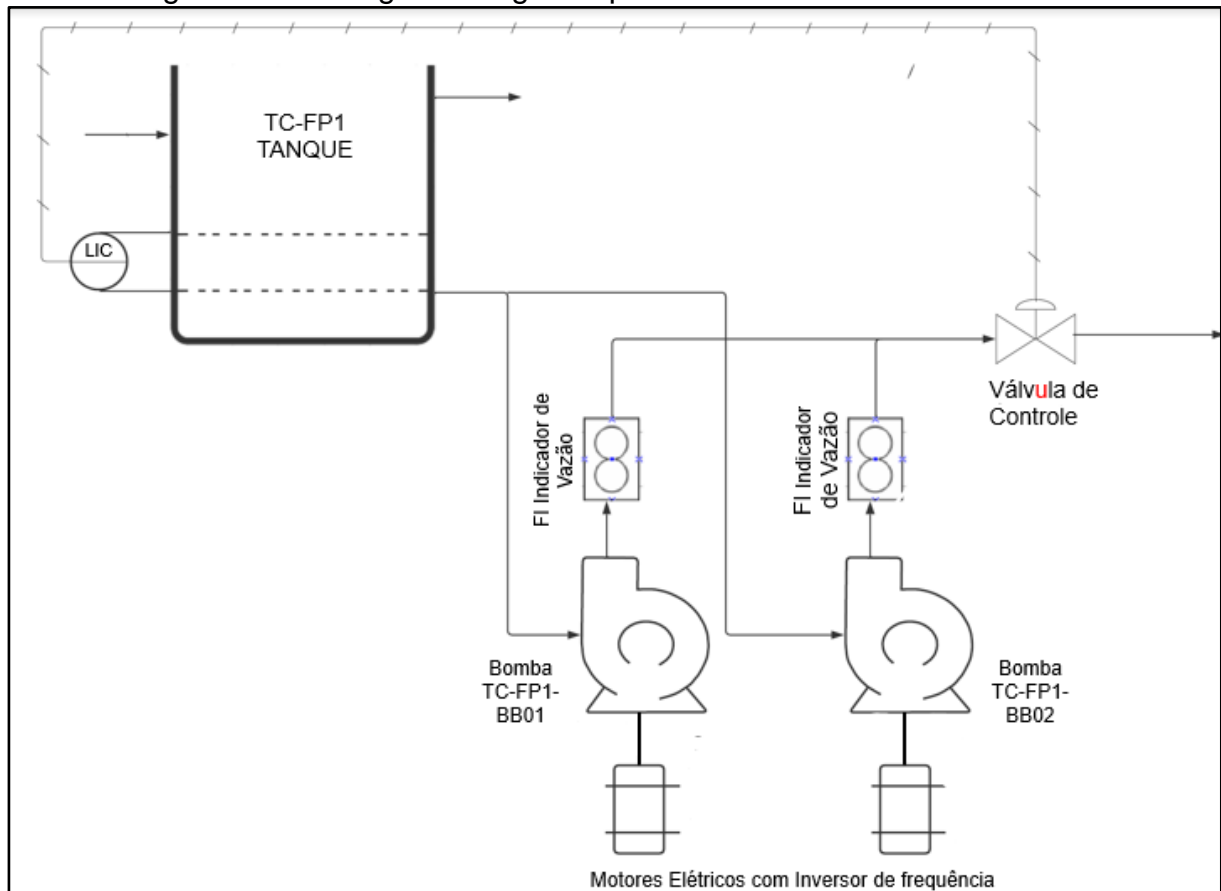
bomba, conforme figura 31. Uma nova análise do projeto foi realizada, para verificar se alterando características da bomba, como medida do rotor e rotação, tornaria a operação em paralelo desnecessária, aplicando desta forma, a operação apenas de uma bomba e a outra como reserva, e constatou-se que para operação apenas de uma bomba, seria necessário a substituição por bombas com maior capacidade vazão, tornando esta solução inviável devido aos custos.

Figura 30 - Fluxograma das Bombas TC-FP1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 31 - Fluxograma sugerido para as bombas TC-FP1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

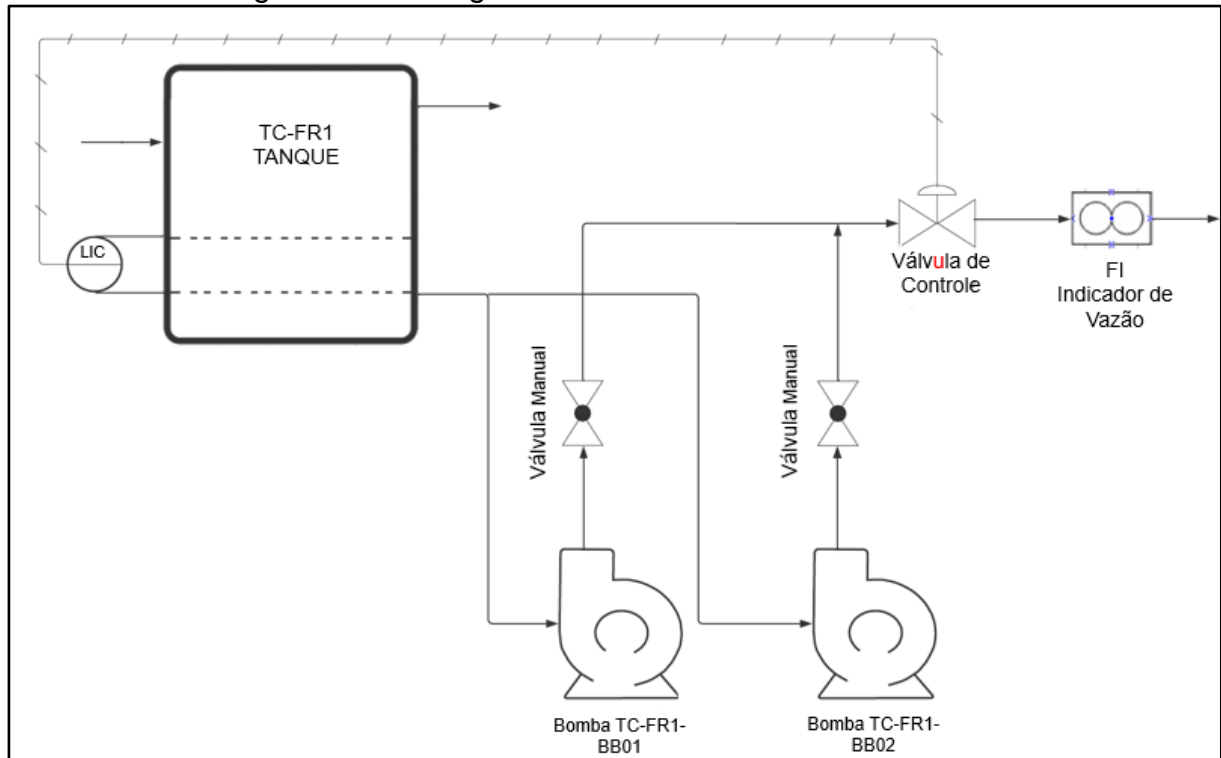
4.1.4 FALHAS X CONDIÇÃO OPERACIONAL - TC-FR1-BB01/02

As bombas TC-FR1-BB01/02, operam em paralelo no posto TC-FR1-BB, e apresentaram um TMEF de 6,18 e 8,65 meses. A vazão operacional média no período foi de 44,52% da vazão do BEP. As falhas apresentaram sintomas de vibração alta, baixo rendimento e vazamento de selagem.

O problema de vibração e aquecimento destas bombas, está ligado a dois fatores principais, que são a condição operacional, que como vemos na figura 24, elas operam abaixo da faixa de vazão aceitável, o outro fator é a utilização de um rotor no menor tamanho possível para a carcaça dela, que facilita a recirculação de fluido na sucção da bomba. Essas duas bombas operam em paralelo, tem seu controle de vazão feito através de uma válvula de controle e uma válvula manual conforme figura 32, porém devido ao único indicador de vazão, não é possível controlar com exatidão a vazão em que cada bomba opera. Após análise do sistema de bombeamento, foi proposto a troca do rotor por um maior, visando melhorar a eficiência da bomba diminuindo espaço entre carcaça e rotor, e a instalação de válvulas de controle

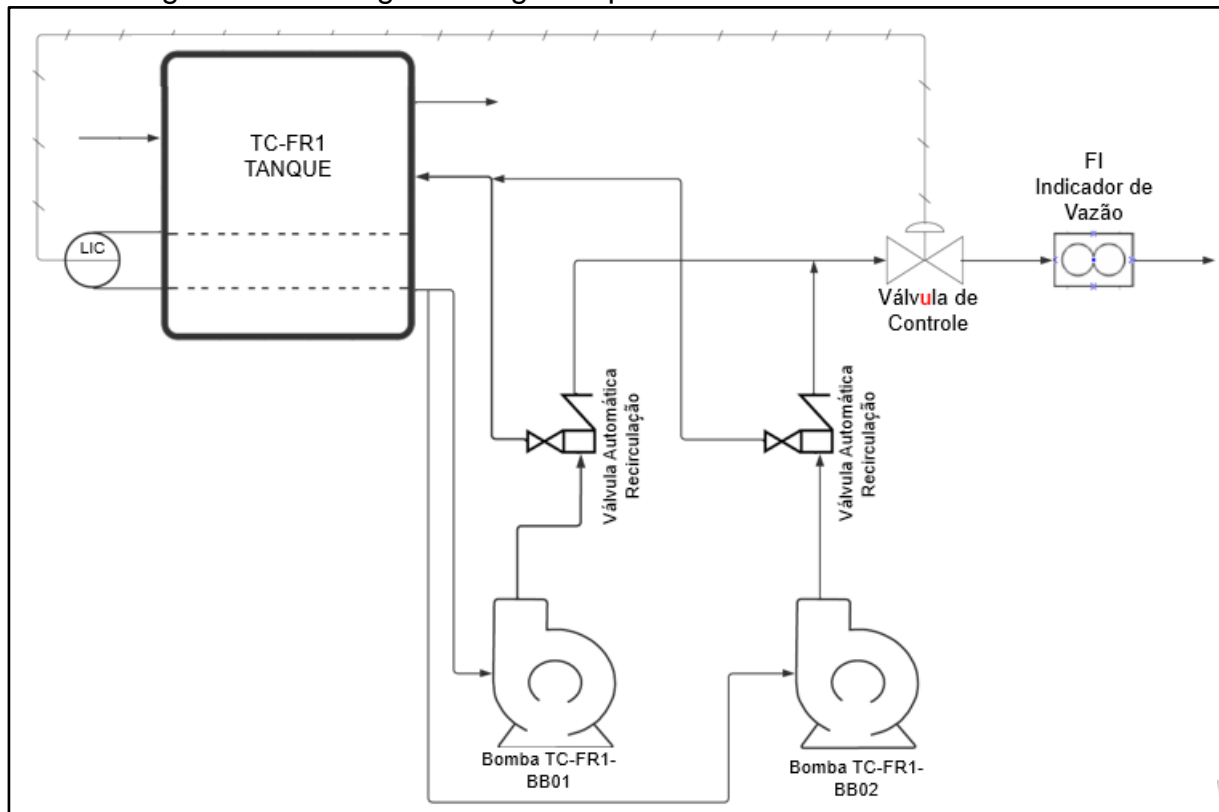
automático de recirculação conforme figura 33, visando proteger as bombas de operarem com vazão próxima da vazão mínima.

Figura 32 - Fluxograma das Bombas TC-FR1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 33 - Fluxograma sugerido para as bombas TC-FR1-BB01/02



Fonte: Elaborado pelo Autor

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho tenta vincular as falhas às condições de operação, das bombas centrífugas, operando no setor de tratamento de caldo em uma usina sucroalcooleira, demonstrando a importante relação da vazão de BEP, com a confiabilidade das bombas.

Dentre os equipamentos de baixa confiabilidade, a bomba TC-FE1-BB01 operou abaixo da linha de vazão mínima, a bomba TC-FE1-BB02 teve boa parte do tempo de operação, também abaixo da linha de vazão mínima, já as bombas TC-FP1-BB01/02 e TC-FR1-BB01/02 operaram acima da vazão mínima, mas abaixo do limite inferior de vazão aceitável, além de serem bombas que operam em paralelo, e com um único medidor de vazão, sendo assim, a vazão medida pode não ser dívida igualmente para as duas bombas que estão operando em paralelo.

Os principais pontos de atenção foram para situações de bombas operando em paralelo, treinando os operadores para garantir que as bombas operando em paralelo estejam nas mesmas condições, a fim da vazão total ser dívida igualmente entre as duas bombas, e também se atentar ao superdimensionamento das bombas

selecionadas, de forma que mesmo trabalhando dentro da vazão de projeto, a mesma não esteja longe da vazão ideal, considerando o ponto de BEP, como nota-se nas bombas TC-FR1-BB01/02, que apesar de trabalhar com vazão de 98,6% da vazão de projeto, esta corresponde a apenas 44,52% do BEP.

Excessiva flexibilidade operacional de bombas centrífugas caminha em sentido oposto à confiabilidade destas, confirmado pelas bombas centrífugas de alta confiabilidade, por serem bombas que operam próximo da vazão do ponto de melhor eficiência.

As principais contribuições gerais deste estudo são o aumento de confiabilidade das bombas centrífugas de baixa confiabilidade. Na bomba TC-FE1-BB01 foram indicadas duas soluções, a modernização do selo mecânico que já foi implementado, e a elaboração do projeto do inversor de frequência para controle de rotação, que está em andamento. No caso das bombas, TC-FP1-BB01/02 e TC-FR1-BB01/02, as soluções indicadas são simples, sendo a principal o treinamento aos operadores sobre detalhes na operação de bombas centrífugas em paralelo, que está em elaboração. Este trabalho pode ser continuado estendendo a outras unidades sucroalcooleiras e até mesmo em outros setores do processo de produção, a fim de identificar as bombas centrífugas de baixa confiabilidade, eliminar as falhas aumentando a confiabilidade e diminuindo os gastos excessivos com manutenção.

REFERÊNCIAS

- MACINTYRE, A. J. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2 ed. LTC Editora: 1997
- MAGALHÃES, F. P.; MAINIERI, O. M. Operação sem riscos, 6. Rio de Janeiro: Petrobras; Brasília: SENAI/DN, 2002.
- PROSSIGA. A Industria do Petróleo. Disponível em: http://www4.prossiga.br/dep-fem-unicamp/petroleo/ind_petr.html . Acesso em: 10 Fever. 2023.
- FERREIRA, F. J.; RODRIGUES, R. C. Monitoramento e controle de processos, 2. Rio de Janeiro: Petrobras Brasília: SENAI/DN, 2003. (Série Qualificação Básica de Operadores).
- HYDRAULIC INSTITUTE - Improving Pumping System Performance: A sourcebook for Industry - Second Edition - U.S. Department of Energy's Industrial Technologies Program (ITP) and Hydraulic Institute (HI).
- LENGSFELD, F. L.; DUARTE, R.; ALTIER, C. Manual de Treinamento: Seleção e Aplicação de Bombas Centrifugas.3º ed. KSB: 1991.
- IMBIL, Soluções em Bombeamento. OH2 manual de instalação, operação e manutenção. Itapira.2011. Disponível em: <https://imbil.com.br/?jet_download=3144>. Acesso em: 05 Abril 2023.
- TRARBACH, R.; BOTELHO, H. C. Adequação das bombas centrífugas da REFAP as condições de projeto. In: I CONGRESSO CONFIABILIDADE, INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO, 2006, Rio de Janeiro, PETROBRAS, 2006
- MATTOS, E. E.; FALCO, R. Bombas industriais. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- SANTOS, S. L. Bombas & instalações hidráulicas. São Paulo: LCTE editora, 2007.
- HICKS, T. G.; Pump Selection and Application, 1.ed. Toronto: McGraw-Hill Book Company, 1957.
- KSB. Manual de curvas características, 2013. Disponível em: <http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=manual_curvas_linha_mega_a2740_42_44_1p_e_s_7.pdf&tipo=curvas>. Acesso em: 08 fever. 2023.
- LIMA, E. P. C.; Mecânica das bombas. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2003.
- LOBANOFF, V. S; ROSS R. R. Centrifugal Pumps. Gulf Publishing Company, 1992.
- HYDRAULIC INSTITUTE. ANSI/HI 9.6.3-Bombas Rotodinâmicas - Diretriz para Regiões Operacionais. 2017. Disponível em: < <https://www.pumps.org/product/ansi-hi-9-6-3-2017-rotodynamic-pumps-guideline-for-operating-regions/>>. Acesso em: 05 Jane. 2023.

DRUMMOND, V. G. Manutenção e Reparo de Bombas, Rio de Janeiro. PETROBRAS S.A. 2006. Apostila.

Bloch, H. P.; Budris, A. R. Pump User's Handbook: Life Extension. Third Edition, 2010. Lafraia, J. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Qualitymark, 2001.

GNEDENKO, B.; USHAKOV, I. Probabilistic Reliability Engineering. Nova Iorque: Wiley, 1995.

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

KSB. Folheto de curvas características, 2014. Disponível em:<www.ksb.com.br>. Acesso em: 08 fev. 2023.

FONSECA, V. F. Bombeamento de Fluidos. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena. Lorena. 2019.

SANTOS, J. C.; FONTES, F. A. O. Análise de Confiabilidade de uma Bomba Centrífuga: Aplicação na injeção de água para recuperação de petróleo. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luis, Anais... São Luis: CONEM, 2012.

IRRIGATION CRAFT. Radial Thrust, 2018. Disponível em: Acesso em: 18 Mai. 2023

BRASIL, A. N. BOMBAS - CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4015/capitulo3_bombasclassificacaoedescricao.pdf>. Acesso em: 15 Fev. 2023.

International Organization of Standardization. Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating, Parts 1. ISO 10816, 1995