



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Bruno Araújo
Guilherme Sobral
Pedro Leal
Pérola Paranaguá
Thiago Amador
Victor Margalho

**PROJETO INFORMACIONAL
ESTUDO DA CONFIABILIDADE DA METODOLOGIA N-1
APLICADA AS BOMBAS DE BFW DA BRASKEM**

SALVADOR
2019

Bruno Araújo
Guilherme Sobral
Pedro Leal
Pérola Paranaguá
Thiago Amador
Victor Margalho

**ESTUDO DA CONFIABILIDADE DA METODOLOGIA N-1
APLICADA AS BOMBAS DE BFW DA BRASKEM**

Este relatório foi desenvolvido como uma etapa parcial do Theoprax, cuja disciplina é Técnicas de Projeto do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC.
Orientador: Profº. Dantani Jorge

SALVADOR

2019

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de Bombas.....	2
Figura 2 - Boiler pressure and BFP discharge pressure.....	3
Figura 3 - Circuito de Água (Desaerador/BFW/Caldeiras).....	5
Figura 4 - Bomba multiestágio com carcaça dupla.....	9
Figura 5 - Bomba com disco de equilíbrio.....	9
Figura 6 - BFP com carcaça de revestimento duplo	10
Figura 7 - Estrutura da BFP para ciclo combinado.....	12
Figura 8 - Estruturas do BFP com melhorias.....	13
Figura 9 - Arranjo com acionamento por turbina.....	15
Figura 10 - Arranjo com acionamento motorizado.....	16
Figura 11 - Arranjo das Bombas.....	18
Figura 12 - Curva Característica das bombas de BFW.....	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Medidas para aumento da robustez.....	14
Quadro 2 - Legenda de Notas.....	21
Quadro 3 - Principais falhas das turbinas A e G.....	22
Quadro 4 - Priorização das Necessidades do Usuário.....	23
Quadro 5 - Análise SWOT do Projeto.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de uma BFP para geração de 700 MW em uma planta de energia termoelétrica.....	8
Tabela 2 - Especificações das bombas principais no arranjo turbinado.....	15
Tabela 3 - Especificações das bombas booster no arranjo turbinado.....	15
Tabela 4 - Especificações dos acionadores turbinados no arranjo turbinado.....	16
Tabela 5 - Especificações das bombas principais no arranjo motorizado.....	16

Tabela 6 - Especificações das bombas booster no arranjo turbinado.....	17
Tabela 7 - Especificações dos acionadores motorizados no arranjo turbinado.....	17
Tabela 8 - Matriz de Gravidade, Urgência e Tendência (GUT).....	20

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - História da Evolução da Pressão de caldeiras e Pressão de descarga de BFPs.....	7
Gráfico 2 - Possíveis falhas x Carga aplicada a bomba.....	20
Gráfico 3 - Gráfico de Custo x Tempo.....	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MÁQUINAS DE FLUXO.....	2
2.1. COMPONENTES MECÂNICOS	3
3. CONDIÇÕES DE PRODUÇÃO E PROCESSO	4
4. BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRAS.....	7
4.1. BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRA (BFW E BFP) ...	7
4.2. ESTRUTURA DA BOMBA PRINCIPAL (BFP)	8
4.2.1. CONFIGURAÇÃO DA BOMBA.....	8
4.2.2. FORMAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA	9
4.2.3. COMPOSIÇÃO MATERIAL	10
4.2.4. VEDAÇÃO DO EIXO E ROLAMENTO	10
4.3. ESTRUTURA DA BOMBA PRINCIPAL (BFP) PARA CICLOS COMBINADOS.....	11
4.3.1. FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DO REVESTIMENTO.....	11
4.3.2. FORMAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA	11
4.3.3. COMPOSIÇÃO MATERIAL	12
4.3.4. VEDAÇÃO DO EIXO E ROLAMENTO	12
4.3.5. MELHORIAS ESTRUTURAIS EM BFPs	12
4.4. BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRAS NA BRASKEM 14	
5. GERAÇÃO DE MATRIZ GUT E PRIORIZAÇÃO POR GRAU DE IMPORTÂNCIA	19
6. DETERMINAÇÃO DOS REQUISITOS DO USUÁRIO.....	22
7. ANÁLISE SWOT DO PROJETO.....	23
8. REFERÊNCIAS	24

1. INTRODUÇÃO

As bombas são equipamentos responsáveis pelo processo de transferência de energia para um fluido, tendo como atividade fim o transporte deste material de um ponto a outro. Esta máquina recebe energia de uma fonte motora qualquer e cede parte dessa energia ao fluido sob forma de energia de pressão, energia cinética ou ambas, dessa forma, ocorrem o aumento da pressão e da velocidade do líquido.

As bombas, principalmente as centrífugas, são de fundamental importância para as indústrias, especialmente as de processo. Sem elas, uma gama enorme de serviços, desde o bombeio das águas, prediais, de caldeiras à produtos químicos, não poderiam ser atendidas de maneira eficaz.

De sua importância para o processo não há qualquer dúvida. As bombas centrífugas, em sua grande maioria, estão localizadas em postos de trabalho nas indústrias e, caso falhem em sua função, as plantas têm a sua capacidade reduzida, podendo até mesmo chegar a parada total.

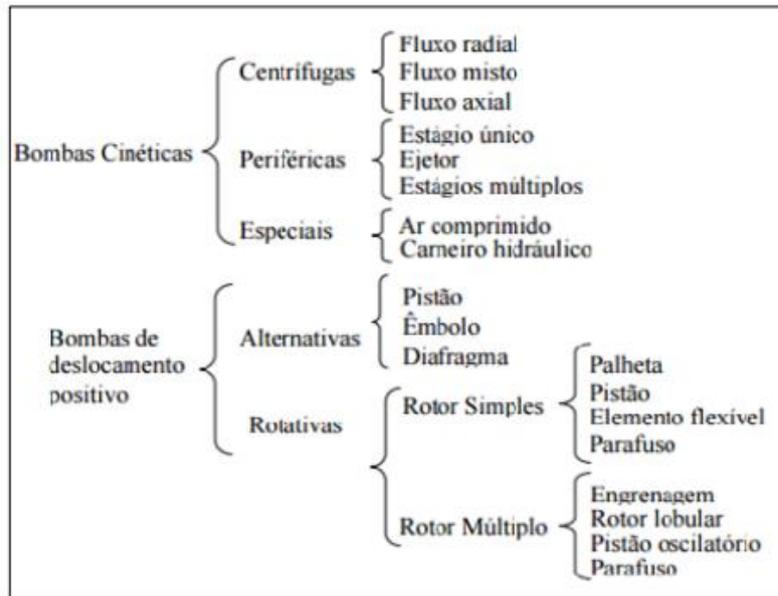
Desta forma, as bombas centrífugas se mostram componentes de grande importância, o que explica o interesse do trabalho em estudar este tipo de equipamento na aplicação prática em uma indústria de geração de vapor.

Em relação aos principais tipos e classificações das bombas industriais, a figura 1 abaixo mostra os principais tipos de bomba.

Neste documento trataremos especificamente da análise de confiabilidade das bombas centrífugas utilizadas no processo de alimentação de água de caldeiras da unidade de Químicos da Braskem S.A. Do ponto de vista do que se entende por confiabilidade, considera-se o conceito estabelecido pela NBR 5462-1994, que diz que:

“Confiabilidade é a capacidade de um item de desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo”.

Figura 1 - Classificação de Bombas



Fonte: Angelo, 2016.

Além do conceito de Confiabilidade, o conceito de falha e defeito são de extrema importância para o embasamento desta análise, que podem ser descritos como:

- a) Falha: Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Depois da falha o item tem uma pane (NBR 5462 - 1994);
- b) Qualquer desvio de uma característica de um item em relação a seus requisitos (NBR 5462 - 1994).

2. MÁQUINAS DE FLUXO

As máquinas de fluxo podem ser classificadas de acordo a sua funcionalidade, configuração e acionamento. Máquinas de fluxo operatrizes ou máquinas acionadas, recebem energia de um acionador (turbina), transformando parte em energia cinética (movimento) e parte em energia de pressão, cedendo-as ao fluido bombeado. Esse trabalho desenvolvido pela máquina tem a função de recircular ou transportar o fluido de um ponto a outro. (MACINTYRE, 1997).

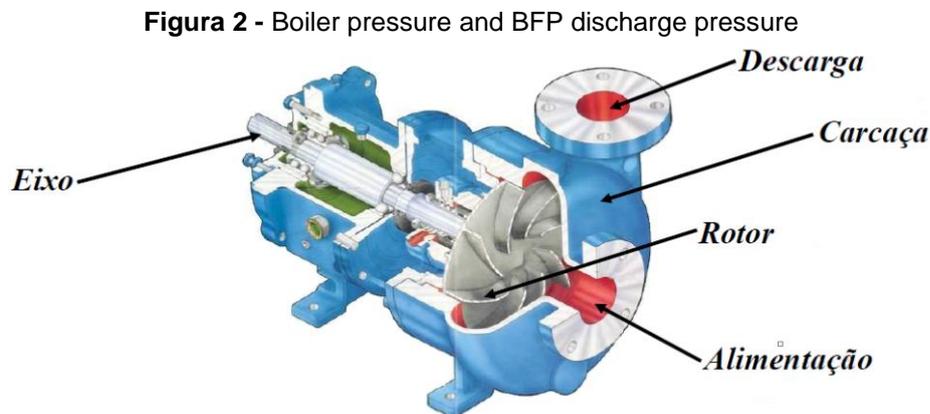
As bombas industriais, por sua vez são máquinas de fluxo operatrizes, estas são comumente classificadas em dois grupos: Bombas Dinâmicas, também

chamadas turbobombas, hidrodinâmicas ou rotodinâmicas; e as Bombas de Deslocamento Positivo, também chamada de bombas volumétricas.

As bombas centrífugas, assim como as que foram analisadas no projeto, são em seu conceito bombas volumétricas de alta capacidade, e por este motivo transfere altas taxas de pressões e velocidades. (MATTOS, 1998).

2.1. COMPONENTES MECÂNICOS

O fluido ao ser comprimido pelo conjunto mecânico (Accionador, eixo, rotor), tem seu volume reduzido, e com o auxílio de uma força (centrífuga ou dinâmica) restringida na carcaça, faz com que seja direcionado para área de descarga (área reduzida), elevando assim sua pressão.



Fonte: Braskem, 2018.

- **Rotor:** Pela definição da norma API 610, rotor é o conjunto de todas as peças girantes, exceto os selos e rolamentos. Sendo composto por eixo, impelidor, porcas de fixação, luvas do eixo e defletores.
- **Impelidor:** Sua função é a de fornecer energia ao líquido sob a forma de pressão e de velocidade. O impelidor raramente é recuperado, a não ser que seja de grande tamanho, sendo quase sempre substituído por um novo quando está desgastado.

- **Eixo:** Sua função é a de transmitir o torque do acionador ao impelidor, que lhe é fixado. Quando apresenta algum tipo de desgaste, é geralmente substituído.
- **Carcaça:** responsável pela contenção do fluido bombeado e provê oportunidade para a conversão da energia cinética contida no fluido em energia de pressão, sendo um passo fundamental para o bombeamento.
- **Descarga:** Função similar a da carcaça, convertendo parte da energia cinética do fluido em energia de pressão e principalmente, servir de direcionador do fluido da saída do rotor.

3. CONDIÇÕES DE PRODUÇÃO E PROCESSO

A unidade termoeletrica (UTE) é responsável pela produção de vapor, fornecimento de ar comprimido e pela geração e distribuição de energia elétrica. É comumente dividida em: Unidade Térmica e Unidade Elétrica.

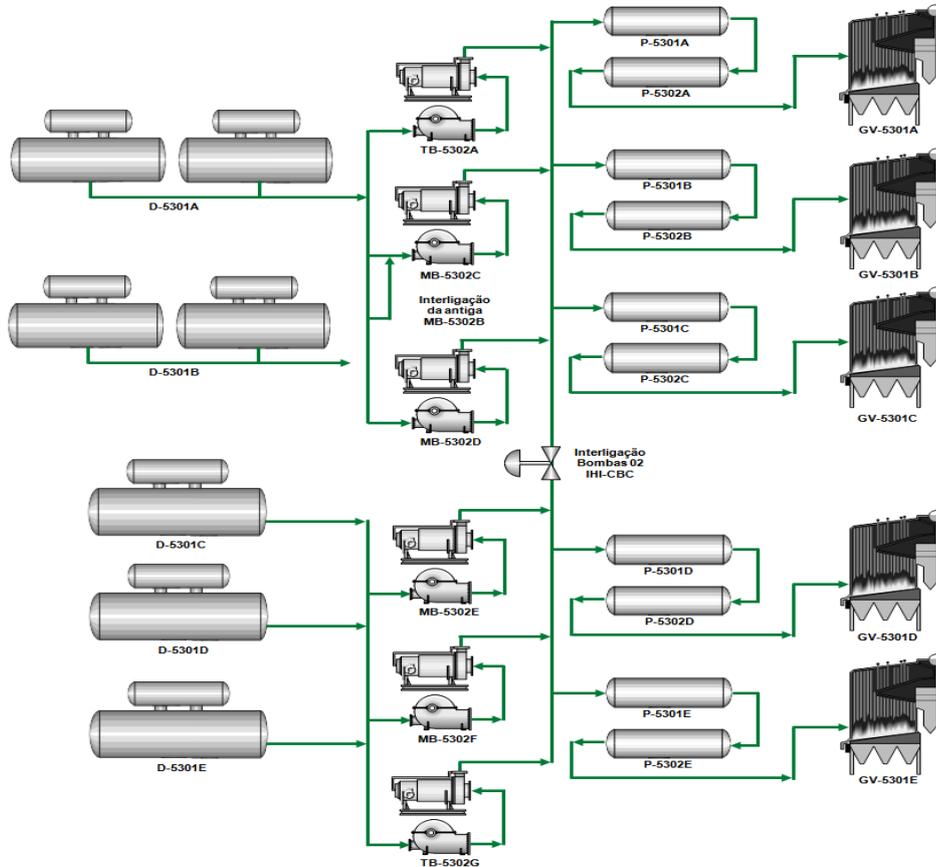
Na unidade térmica da Q1, que será o foco deste projeto, o vapor de 120 kgf/cm², ou V-120, é produzido em grandes caldeiras aquatubulares através da vaporização da água desmineralizada produzida na unidade de tratamento de água (UTA).

Considerando as especificações de projeto das 6 caldeiras, existem cinco caldeiras maiores que possuem capacidade nominal de geração de 400 t/h de vapor especificado cada uma. Essa capacidade pode chegar à capacidade de pico de 440 t/h durante duas horas contínuas. Existe também caldeira menor, chamada de caldeira de recuperação (GV-H), que realiza o aproveitamento dos gases da combustão de uma turbina a gás para gerar 50 t/h de vapor especificado, capacidade que é aumentada através da queima complementar de gás combustível, que eleva a capacidade nominal para 100 t/h.

No entanto, mesmo com capacidades de projeto elevadas para uma grande produção de vapor, a demanda de vapor da UTE (Unidade Termoeletrica) apresentou uma enorme queda com o passar dos anos, chegando a atual demanda

média de 860t/h. O design do sistema foi montado para atender uma demanda de vapor de até 2000t/h com um sistema de bombas de alimentação de água de caldeira (BFW) composto por 6 bombas, sendo 2 delas turbinadas e 4 motorizadas.

Figura 3 - Circuito de Água (Desaerador/BFW/Caldeiras)



Fonte: Módulo de Operação Braskem (Uberam Barros), 2018.

Após a desaeração (retirada de ar do fluido), a água de alimentação que possui uma densidade de $0,925\text{g/cm}^3$ é recalçada para as caldeiras por seis bombas centrífugas, distribuídas da seguinte maneira:

- Lado IHI:
 - TB-5302A;
 - MB-5302C;
 - MB-5302D;
- Lado CBC:
 - MB-5302E;
 - MB-5302F;
 - TB-5302G;

Cada uma dessas bombas, é, na verdade, uma associação de duas bombas, que operam em série: uma bomba booster e uma principal. Dentre as variáveis de processo pode-se afirmar que a temperatura na sucção da bomba é de 142.2°C e a pressão no valor de 3,95 kg/cm².

Da descarga das bombas 5302, a água é impulsionada para os pré-aquecedores de água de alimentação, que são grandes trocadores de calor. Cada caldeira, tanto IHI quanto CBC, possui dois desses trocadores, operando em série:

- P-5301, que promove a troca térmica entre a água e vapor de 15 kgf/cm²;
- P-5302, onde pode ou não haver troca térmica com vapor de 42 kgf/cm²;

Destes equipamentos, a água é conduzida para dentro da caldeira, passando primeiramente pelo economizador, como ilustrado na Figura 3 acima.

O sistema atualmente apresenta mais que 100% de redundância, visto que cada bomba possui capacidade de descarga de 555 t/h, constatando-se assim que duas bombas atenderiam à demanda ainda com margem positiva de fornecimento de água.

As condições de operação atuais das bombas que estão alocadas no lado correspondente as caldeiras de tecnologia CBC (Companhia Brasileira de Caldeiras e Equipamentos Pesados) correspondem a uma vazão média de 496t/h, enquanto as do lado IHI (Ishikawa Heavy Industries) com 364t/h. Os dois lados trabalham abaixo da vazão mínima com recirculação externa de água com o intuito de manter os ativos operando e evitar problemas mecânicos como cavitação e vibração excessiva. Devido a uma baixa eficiência e um baixo MTBF do equipamento em relação ao que é especificado pela **API 610-11a**:

“Espera-se que bombas centrífugas industriais, para serviços pesados em refinarias, petroquímicas e plantas de geração de energia, realizem seu trabalho sem queda de eficiência por pelo menos 3 anos ininterruptos”.

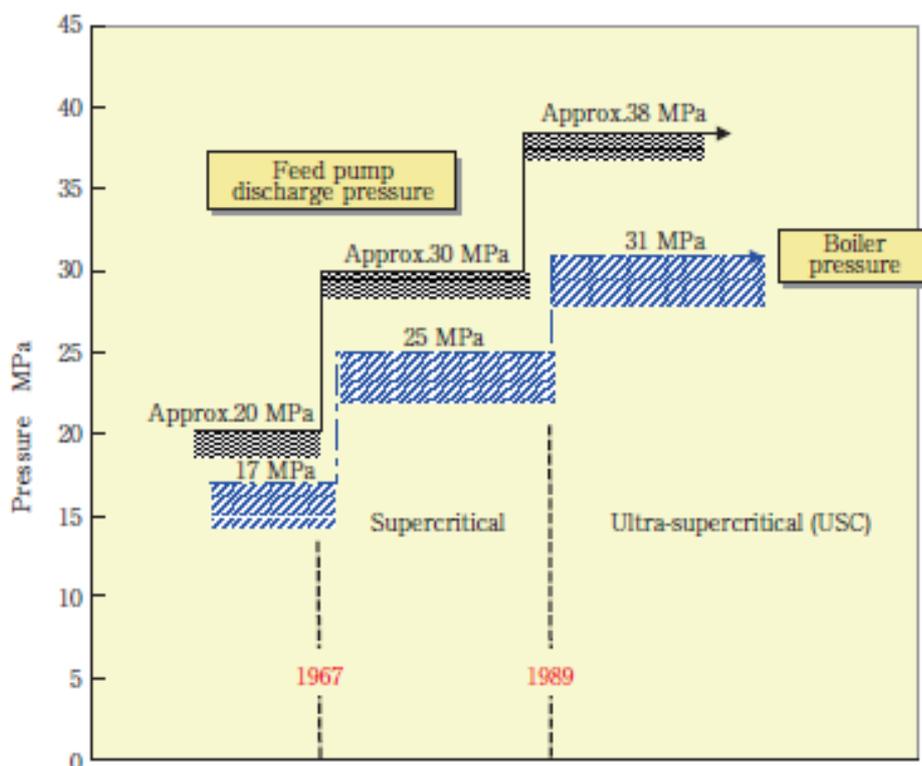
4. BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRAS

4.1. BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRA (BFW E BFP)

A BFP (Boiler Feed Pump) é uma bomba de alta pressão de bombeamento geralmente utilizada em plantas de geração de energia térmica. Por conta disso essas bombas são normalmente classificadas como críticas, logo requerem um nível de confiabilidade alto, além de uma alta capacidade, visto que estas operaram em condições muito severas, principalmente na partida e na parada YOSHIKAWA (2016).

As bombas de BFW tem como função bombear água a alta temperatura e pressão para as caldeiras e para toda a planta, logo uma vez que as caldeiras e tubulações evoluem tecnologicamente as bombas BFP devem acompanhar, visto que precisam suprir sempre uma nova demanda.

Gráfico 1 - História da Evolução da Pressão de caldeiras e Pressão de descarga de BFPs.



Fonte: YOSHIKAWA, 2016.

Tabela 1 - Especificações de uma BFP para geração de 700 MW em uma planta de energia termoelétrica

Purpose		Main feed water	Start-up and backup
Capacity	t/h	1200	730
Discharge pressure	MPa	38.05	37.26
Rotation speed	min ⁻¹	6000	6300
Water temperature	°C	188.4	184.1
Drive		Steam turbine	Motor drive (with a fluid coupling)
Output	kW	17500	12000
Number of units		2	1

Fonte: YOSHIKAWA, 2016.

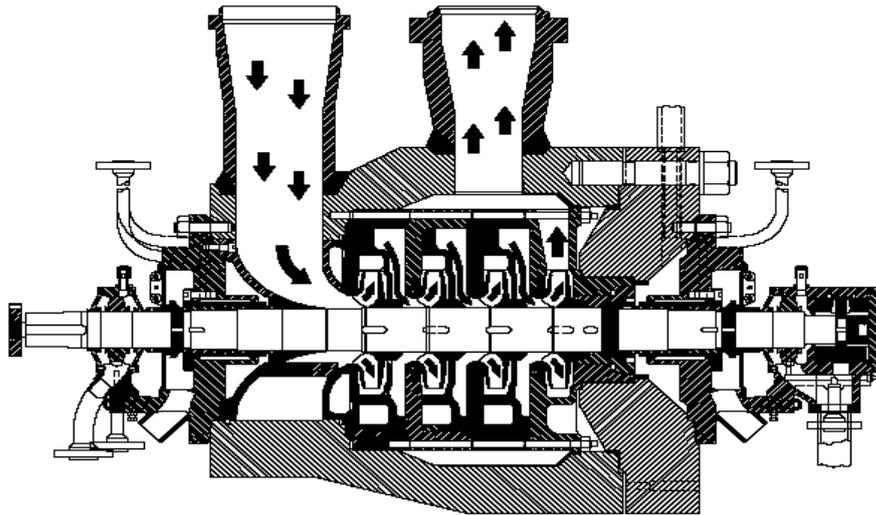
4.2. ESTRUTURA DA BOMBA PRINCIPAL (BFP)

4.2.1. CONFIGURAÇÃO DA BOMBA

As bombas BFP geralmente são de múltiplos estágios, do tipo barril com dupla carcaça, confeccionadas para aguentarem altas pressões e temperaturas. Elas também contêm uma única peça cilíndrica que é forjada, obtendo assim alta rigidez. As bombas BFP também possuem rotor e carcaça, que são fixados na extremidade a uma tampa por parafusos.

A carcaça externa é um cilindro espesso simples, que não sofre com a alta pressão e nem suas mudanças. Este cilindro é preso a tampa de descarga com parafusos e uma junta espiral, para assim evita o vazamento de água. Os parafusos são devidamente torquados e controlados com uma chave hidráulica, ou aquecedor de parafuso ou um tensor de parafuso, desta forma garantindo uma força constante na fixação.

Figura 4 - Bomba multiestágio com carcaça dupla.



Fonte: Engineers Edge, 2016.

4.2.2. FORMAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA

A parte interna da carcaça é dividida em dois grupos: o primeiro usa uma combinação de carcaça bipartida axial, impulsor de arranjo inverso e traseiro, o segundo grupo usa a combinação de um anel carcaça da seção, impulsor direto e um tipo de difusor, este grupo requer um disco de equilíbrio ou um componente similar para equilibrar o impulso axial.

Figura 5 - Bomba com disco de equilíbrio.



Fonte: GANGHIS, Diógenes. 2019.

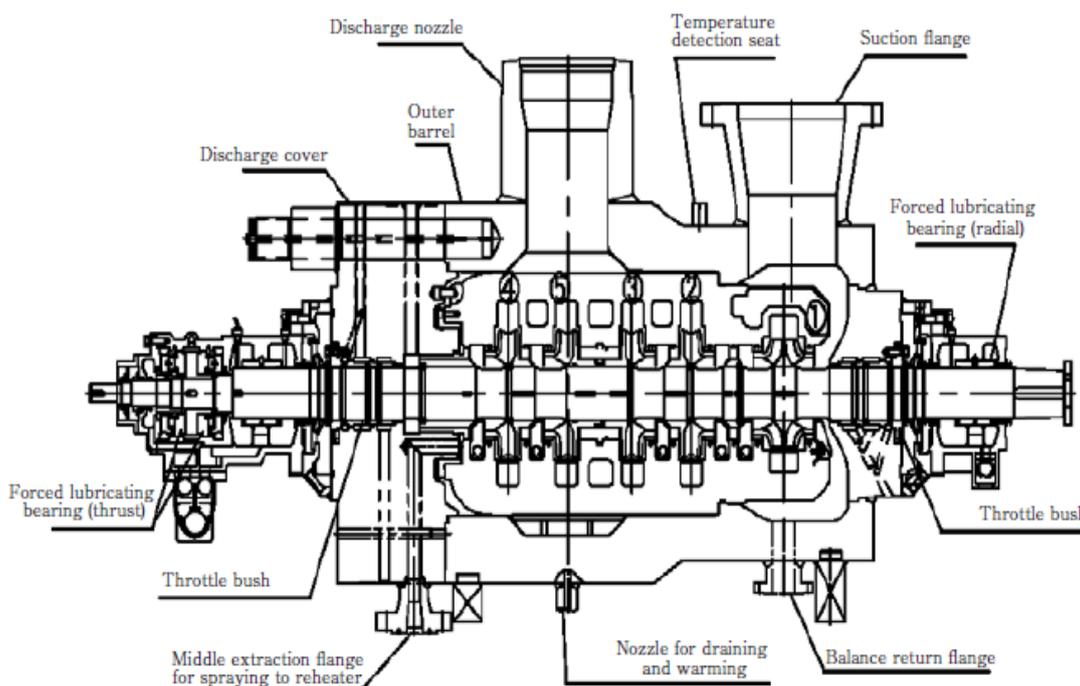
4.2.3. COMPOSIÇÃO MATERIAL

A carcaça externa e a tampa de descarga, que são componentes sujeitos à pressão, são feitos de aço carbono forjado. A superfície da junta das seções de alta velocidade é coberta com aço inoxidável austenítico para evitar erosão. A carcaça interna e o impulsor são feitos de aço inoxidável fundido martensítico 13Cr ou 13Cr-4Ni.

4.2.4. VEDAÇÃO DO EIXO E ROLAMENTO

O uso de bucha do acelerador sem contato ou anéis flutuantes é comum, já que provavelmente não se desgastam sob condições de alta velocidade e pressão e são adequadas para operações contínuas. Os vedantes mecânicos também podem ser utilizados para os rolamentos a lubrificação forçada é aplicada.

Figura 6 - BFP com carcaça de revestimento duplo



Fonte: YOSHIKAWA, 2016.

4.3. ESTRUTURA DA BOMBA PRINCIPAL (BFP) PARA CICLOS COMBINADOS

4.3.1. FORMAÇÃO DA ESTRUTURA DO REVESTIMENTO

As bombas BFP podem atuar em ciclos combinados caso seja necessário o fornecimento de uma descarga com pressão de 15 a 20 MPa a 150°C e não seja viável utilizar uma bomba supercrítica, por isso as bombas de estágio único tipo seção com anel e de vários estágios são recomendadas para o ciclo combinado. O invólucro do tipo seção anel consiste em parafusos de invólucro de sucção, com as juntas entre os invólucros vedadas, com toque metálico, com base na pressão de contato dos parafusos. Um anel de vedação também pode ser montado a fim de mitigar o vazamento da água.

4.3.2. FORMAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA

Uma unidade de BFP tem capacidade de alimentar os geradores de vapor com água a média e alta pressão. O fluido que irá alimentar o tambor de alta pressão é pressurizado, o que causa variação da velocidade do impelidor.

As bombas têm todos os impelidores em uma direção, assim requerem um balanceamento de impulso, que pode ser feito de duas formas: balanceamento de disco e balanceamento tambor. Se a pressão do balanceamento diminui, a temperatura da água aumenta. Quando a pressão de vapor saturado da água somado a temperatura da água resultar em uma pressão maior que a de sucção, a água pode acabar voltando para a entrada da bomba, logo, a bomba não irá funcionar corretamente. Para resolver este problema é necessário realizar a desaeração da água que está contida na tubulação de balanceamento (YOSHIKAWA, 2016).

As bombas que possuem impulsor de sucção dupla no primeiro estágio são mais usadas, isso acontece porque permitem reduzir o NPSH necessário pela metade do fluxo de sucção devido a sucção dupla.

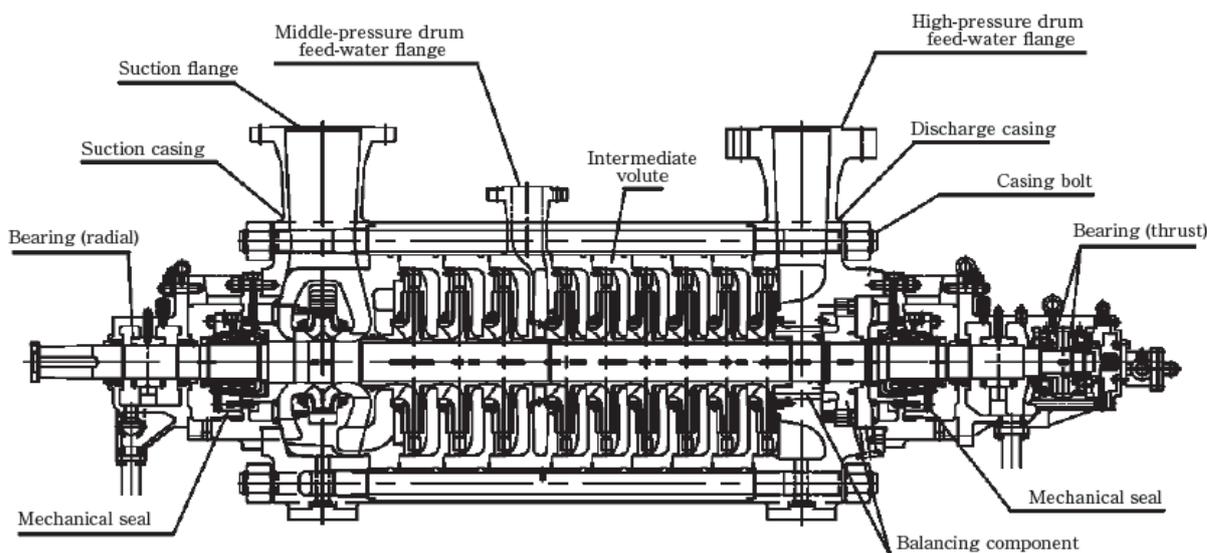
4.3.3. COMPOSIÇÃO MATERIAL

A carcaça de sucção, descarga e extração são feitos de aço inoxidável fundido 13Cr-4Ni, resistente o suficiente contra a pressão de trabalho. A carcaça entre estágios também é feita do mesmo material.

4.3.4. VEDAÇÃO DO EIXO E ROLAMENTO

A vedação por selo mecânico garante menor emissão fugitiva, já que as condições de pressão e velocidade periféricas são menos severas do que as condições de operação classificadas como alta criticidade para BFPs. O rolamento utilizado é de lubrificação forçada e a auto lubrificação é aplicável, a fim de aumentar a segurança.

Figura 7 - Estrutura da BFP para ciclo combinado



Fonte: YOSHIKAWA, 2016.

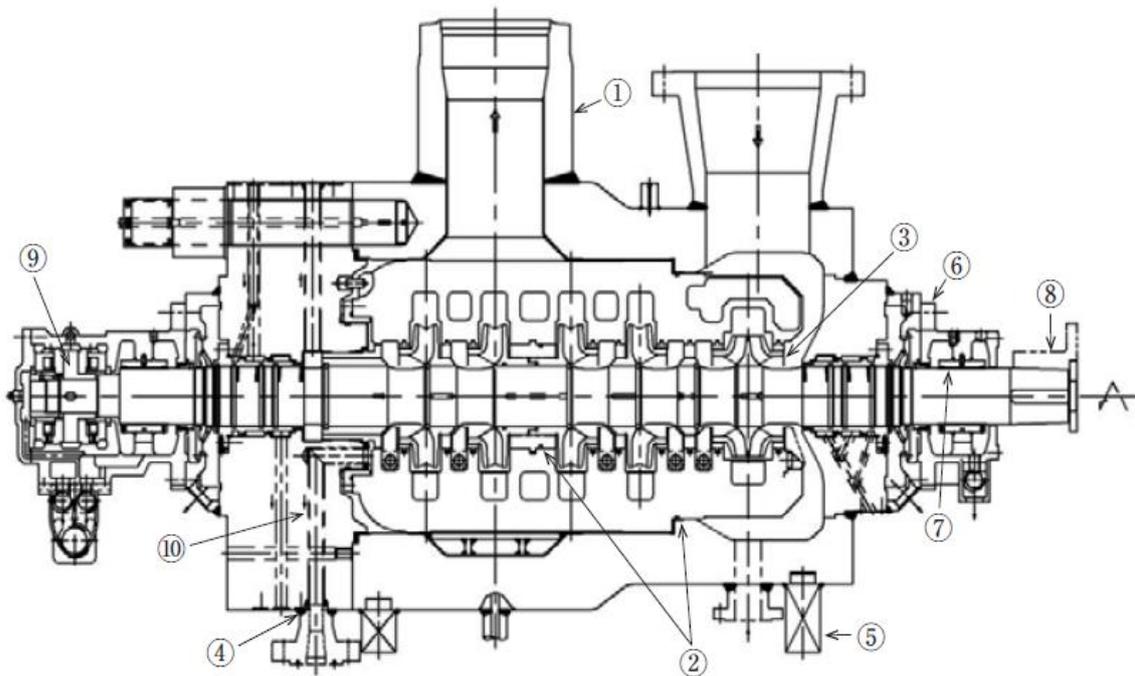
4.3.5. MELHORIAS ESTRUTURAIS EM BFPs

As BFPs vem sendo menos utilizadas para geração de energia, visto que existem diversas outras formas de se obter energia atualmente. Com isso a BFP passa a operar em condições mais severas, como aumento da frequência de partidas e de paradas, mudanças na temperatura da água de alimentação, aumento

da frequência de operação com baixa vazão. A fim de adaptar a BFP a esse novo cenário foi necessário deixá-la mais robusta, alterando sua estrutura, material e design.

O quadro a seguir mostra alguns componentes ou partes específicas que devem ser aprimorados, além de fenômenos e as causas desses. As sugestões de melhorias foram feitas com intuito de aumentar a confiabilidade da bomba resolvendo seus problemas naturais e dos problemas que surgiram com a mudança de cenário e parâmetros.

Figura 8 - Estruturas do BFP com melhorias



Fonte: YOSHIKAWA, 2016.

Quadro 1 - Medidas para aumento da robustez.

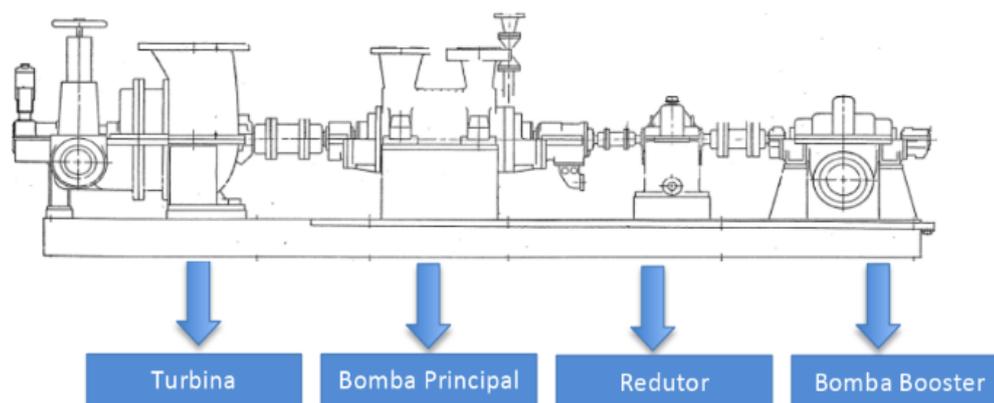
No	Degradação	Causas	Medida para aumentar a robustez
1	Redução da espessura da parede do bico de descarga	Erosão causada por alta velocidade e / ou fluxo irregular	Sobreposição de aço inoxidável austenítico na superfície interna
2	Erosão da parte de alta pressão diferencial da voluta interna	Desempenho de vedação degradado da vedação de toque de metal ou gaxeta auto comprimida associada ao aumento das frequências de ações de partida e parada	Usando um O-ring auxiliar em combinação
3	Cavitação incipiente	Maior duração da operação de baixo fluxo associada à adoção do DSS, etc.	Substituindo o impulsor do primeiro estágio por um novo projetado para baixa relação à configuração da entrada
4	Rachaduras na parte à qual a tubulação auxiliar está conectada	Impacto da pulsação causada pelo aumento da duração da baixa operação	Modificando o topo do bico para que ele seja uma estrutura mais rígida
5	Vibração causada por desalinhamento	Alterações na carga do bico associadas a frequências aumentadas de ações de partida e parada	Instalando um dispositivo estabilizador
6	Maior vibração do rolamento	Impacto da pulsação causada pelo aumento da duração da operação de baixo fluxo	Usando uma carcaça de rolamento circular completa
7	Metal de rolamento danificado	Danos em fios de lã do eixo de aço 13Cr causados por partículas estranhas no óleo lubrificante	Sobreposição de aço carbono no munhão do eixo principal
8	Ocorrendo alterações bruscas de vibração	Bloqueio de torque causado por deslizamento inadequado da superfície do dente do acoplamento de engrenagem	Atualizando para um acoplamento de disco flexível
9	Corrosão por atrito na parte de montagem do disco axial	Menor torque da porca da extremidade do eixo. Disco fixo solto causado por distorção secular da superfície de contato do disco	Usando uma porca na extremidade do eixo de um tipo de luva de travamento Usando um disco de impulso do tipo hub longo
10	Vedação mecânica degradada para sangria entre os estágios	Não há manutenção por um longo tempo, pois é instalado na tampa de sucção e não é necessário quando o rotor da voluta interna desmontar	Interrompendo o uso do tubo de sangria e do selo mecânico como estrutura para extração da tampa de descarga

Fonte: YOSHIKAWA, 2016.

4.4. BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRAS NA BRASKEM

O sistema possui dois tipos de acionamento, turbinado e motorizado. O arranjo do sistema de acionamento turbinado se dá na seguinte ordem: Turbina, bomba principal, redutor e bomba booster.

Figura 9 - Arranjo com acionamento por turbina



Fonte: Braskem, 2018.

Tabela 2 - Especificações das bombas principais no arranjo turbinado

Bomba principal	B-5302A	B-5302G
Fabricante	Ebara MFG CO.	Ebara MFG CO.
Modelo	250x200SS4T	250x200SS4T
Série	R415217-01	R610481-01
Número de estágios	4	4
Capacidade de sucção (t/h)	588	555
Capacidade de descarga para caldeira	533	500
Rotação por minuto	3850	3956
Pressão de sucção (kgf/cm ²)	11	11
Pressão de descarga (kgf/cm ²)	160	160
Potência (kW)	2772	2826

Fonte: Braskem, 2018.

Tabela 3 - Especificações das bombas booster no arranjo turbinado

Bomba booster	B-5302A	B-5302G
Fabricante	Ebara MFG CO.	Ebara MFG CO.
Número de estágio	1	1
Capacidade de sucção (t/h)	588	588
Capacidade de descarga para caldeira (t/h)	588	588
Rotação por minuto	1780	1780
Pressão de sucção (kgf/cm ²)	5	5
Pressão de descarga (kgf/cm ²)	11	11

Fonte: Braskem, 2018.

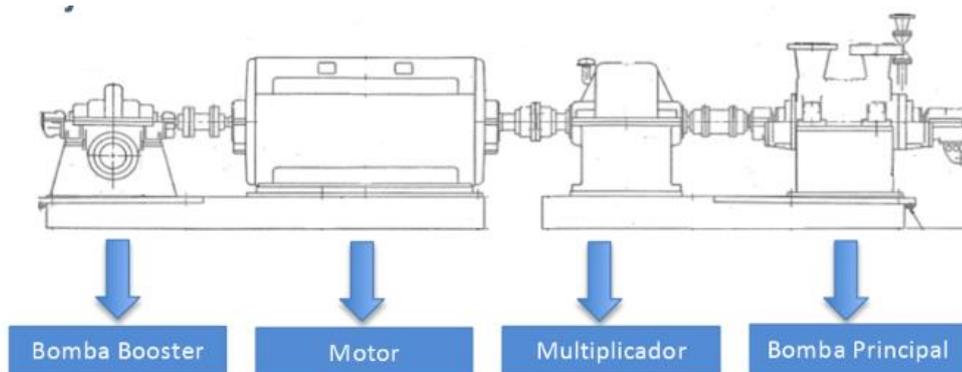
Tabela 4 - Especificações dos acionadores turbinados no arranjo turbinado

Acionador Turbinado	TB-5302A	TB-5302G
Fabricante	Ebara MFG CO.	M.Dedine S.A
Tipo	Simples Estágio	Simples Estágio
Potência nominal (CV)	2970	4500
Pressão de vapor na admissão (kgf/cm²)	13,5 - 16,5	14,0 - 18,0
Pressão de vapor na descarga (kgf/cm²)	0,24 - 1,3	0,60 - 1,0

Fonte: Braskem, 2018.

Enquanto a do acionamento motorizado se dá por bomba booster, motor, multiplicador bomba principal.

Figura 10 - Arranjo com acionamento motorizado



Fonte: Braskem, 2018.

Tabela 5 - Especificações das bombas principais no arranjo motorizado

Bomba principal	B-5302C/D	B-5302E/F
Fabricante	Ebara MFG CO.	Ebara MFG CO.
Modelo	250x200SS4GM	250x200SS4GM
Série	R415216-01	R610481-01
Número de estágios	4	4
Capacidade de sucção (t/h)	588	555
Capacidade de descarga para caldeira	555	500
Rotação por minuto	3850	3956
Pressão de sucção (kgf/cm²)	11	11
Pressão de descarga (kgf/cm²)	160	160
Potência (kW)	2772	2826

Fonte: Braskem, 2018.

Tabela 6 - Especificações das bombas booster no arranjo turbinado

Bomba booster	B-5302C/D	B-5302E/F
Fabricante	Ebara MFG CO.	Ebara MFG CO.
Número de estágio	1	1
Capacidade de sucção (t/h)	588	588
Capacidade de descarga para caldeira (t/h)	588	588
Rotação por minuto	1780	1780
Pressão de sucção (kgf/cm ²)	5	5
Pressão de descarga (kgf/cm ²)	11	11

Fonte: Braskem, 2018.

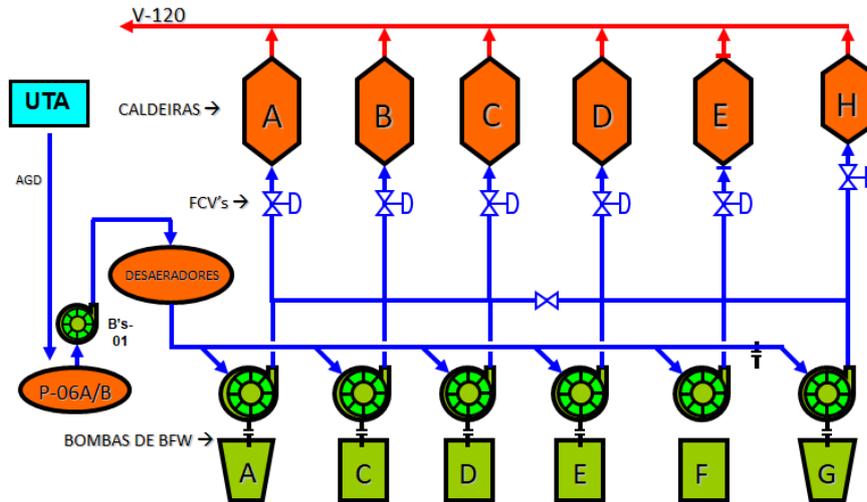
Tabela 7 - Especificações dos acionadores motorizados no arranjo turbinado

Acionador Motorizados	B-5302C/D	B-5302E/F
Fabricante	General Eletric do Brasil S.A	General Eletric do Brasil S.A
Potência Consumida	4.320CV / 3.189kW	4.320CV / 3.189kW
Tensão (V)	4.000 / 60Hz	4.000 / 60Hz
Número de polos	4	4
Regime de serviço	Contínuo	Contínuo
Corrente Nominal (A)	520	520
Corrente de Partida (A)	3.226	3.226

Fonte: Braskem, 2018.

A bomba A, que está desativada, e a bomba G possuem acionamento por turbina. Já as bombas C, D, E e F possuem acionamento por motor. Todas as bombas possuem 4 estágios, e os seus respectivos impelidores possuem 419 mm de diâmetro. Nas bombas A, C e D existe uma diferença de espessura dos dois primeiros em relação aos dois últimos estágios, já nas bombas E, F e G, o primeiro estágio é diferente dos últimos 3 estágios.

Figura 11 - Arranjo das Bombas



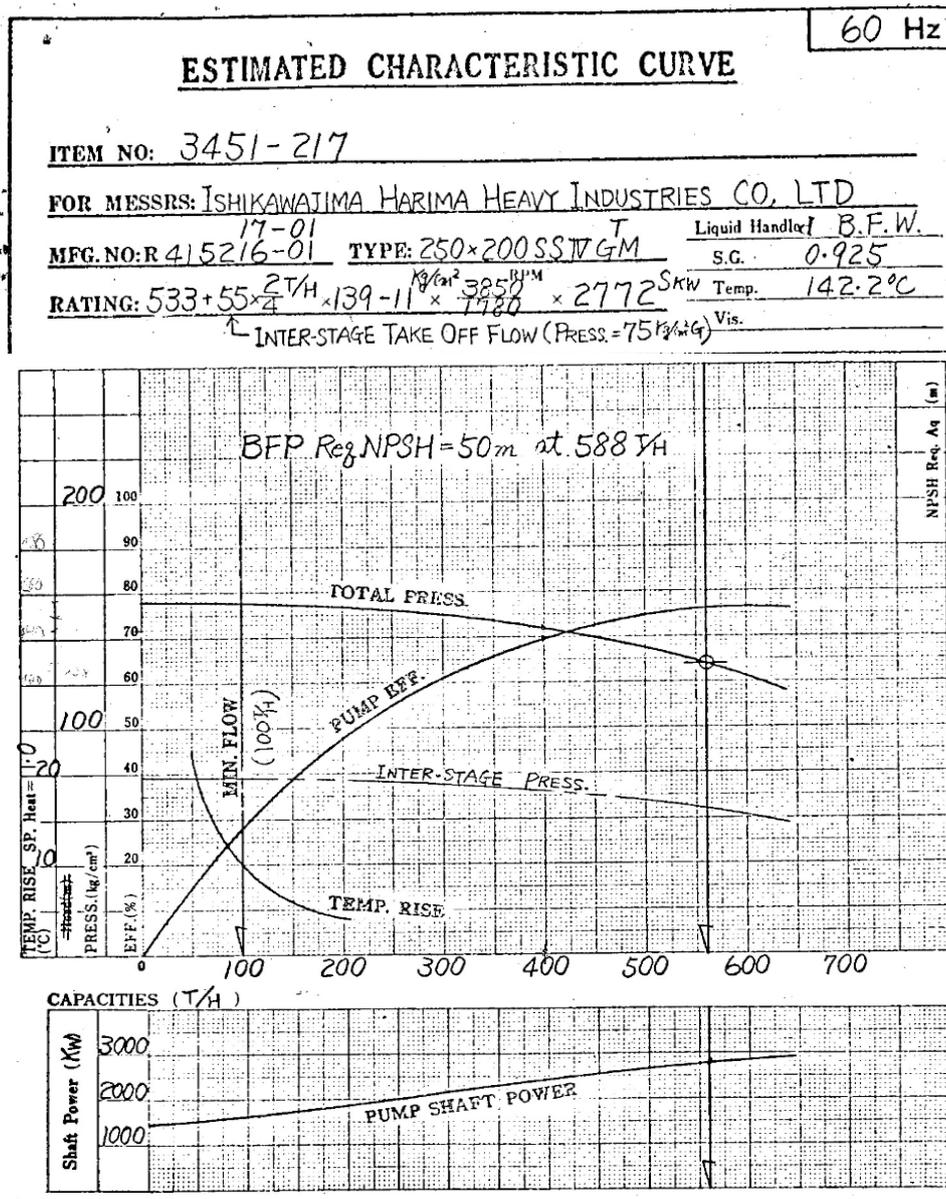
Fonte: Braskem, 2018.

Além da sua configuração construtiva, outra variável importante característica deste equipamento é a curva da bomba. A curva característica serve para descrever as condições operacionais de uma bomba e permite relacionar a variação de altura manométrica com a vazão a uma velocidade constante. O ponto de cruzamento das duas curvas (da bomba e do sistema) define o ponto de operação ideal (BEP) da bomba. O Net Positive Suction Head (NPSH), ou carga líquida positiva de sucção requerido pelo fabricante, informado na curva característica, também é fundamental para que a pressão dentro da bomba não caia abaixo da pressão de vapor do líquido. De acordo com Fox, McDonald e Pritchard (2006, p.525):

“A cavitação pode ocorrer em qualquer máquina trabalhando com líquido, sempre que a pressão estática local cair abaixo da pressão de vapor do líquido. Quando isto ocorre, o líquido pode localmente passar de líquido para vapor instantaneamente, formando uma cavidade de vapor e alterando significativamente a configuração do escoamento em relação à condição sem cavitação.”

Devido ao rápido aumento de pressão dentro da bomba, as bolhas de vapor surgidas se fundem em uma dada zona com ausência de líquido provocando o efeito conhecido como cavitação.

Figura 12 - Curva Característica das bombas de BFW

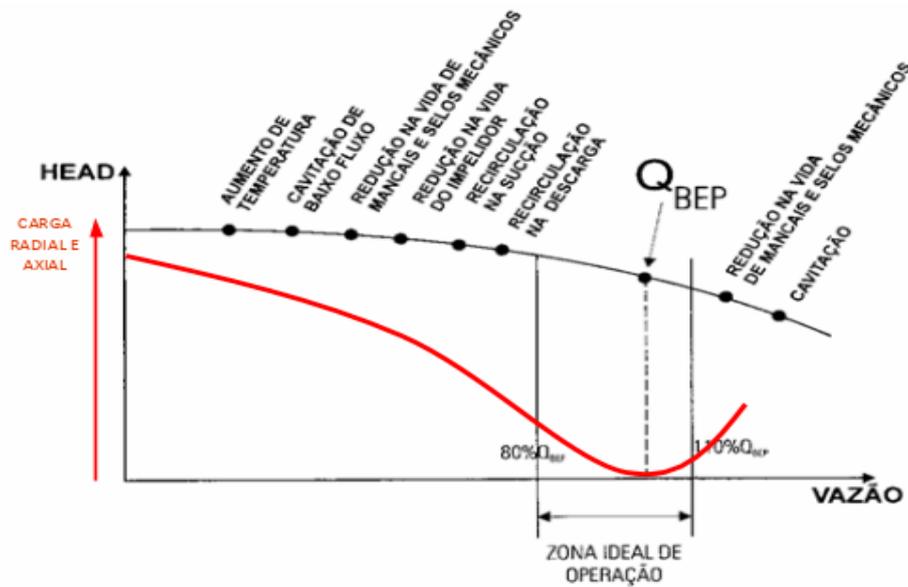


Fonte: Ebara, 2016.

5. GERAÇÃO DE MATRIZ GUT E PRIORIZAÇÃO POR GRAU DE IMPORTÂNCIA

Os eventos de falhas, cuja as bombas de alimentação de água das caldeiras podem ser submetidas, devem ser estudados. Para isso, uma matriz de gravidade, urgência e tendência (GUT) foi elaborada para verificar quais as falhas que mais impactam no equipamento e conseqüentemente no processo. Para o desenvolvimento desta matriz, o gráfico mostrado abaixo foi utilizado como referência.

Gráfico 2 - Possíveis falhas x Carga aplicada a bomba



Fonte: Braskem, 2018.

Tabela 8 - Matriz de Gravidade, Urgência e Tendência (GUT)

Matriz GUT					
Problema	Gravidade (G)	Urgência (U)	Tendência (T)	Importância (I)	Prioridade (P)
Aumento De Temperatura	3	2	2	12	9
Cavitação De Baixo Fluxo	5	5	5	125	2
Redução Na Vida De Mancais E Selos Mecânicos	3	3	4	36	5
Redução Na Vida Do Impelidor	3	3	4	36	6
Recirculação Na Sucção	5	5	5	125	3
Recirculação Na Descarga	4	4	4	64	4
Vibração Excessiva	5	5	5	125	1
Vazamento Pelo Selo Mecânico	3	3	3	27	7
Desbalanceamento Axial	4	3	3	24	8

Fonte: Própria, 2019.

A matriz GUT revela que dentre os possíveis modos de falha listados pelo gráfico mostrado acima, aqueles que possuem maior gravidade, urgência e tendência são a vibração excessiva e a cavitação em bombas. Estes dois modos de falha se apresentam comumente em bombas que trabalham abaixo do fluxo mínimo de operação do equipamento.

Quadro 2 - Legenda de Notas

Nota	Gravidade (G)	Urgência (U)	Tendência (T)
1	Sem Gravidade	Sem Urgência	Não Irá Mudar
2	Pouco Grave	Pouco Urgente	Irá Piorar A Longo Prazo
3	Grave	Urgente	Irá Piorar A Médio Prazo
4	Muito Grave	Muito Urgente	Irá Piorar A Curto Prazo
5	Extremamente Grave	Ação Imediata	Irá Piorar Imediatamente

Fonte: Própria, 2019.

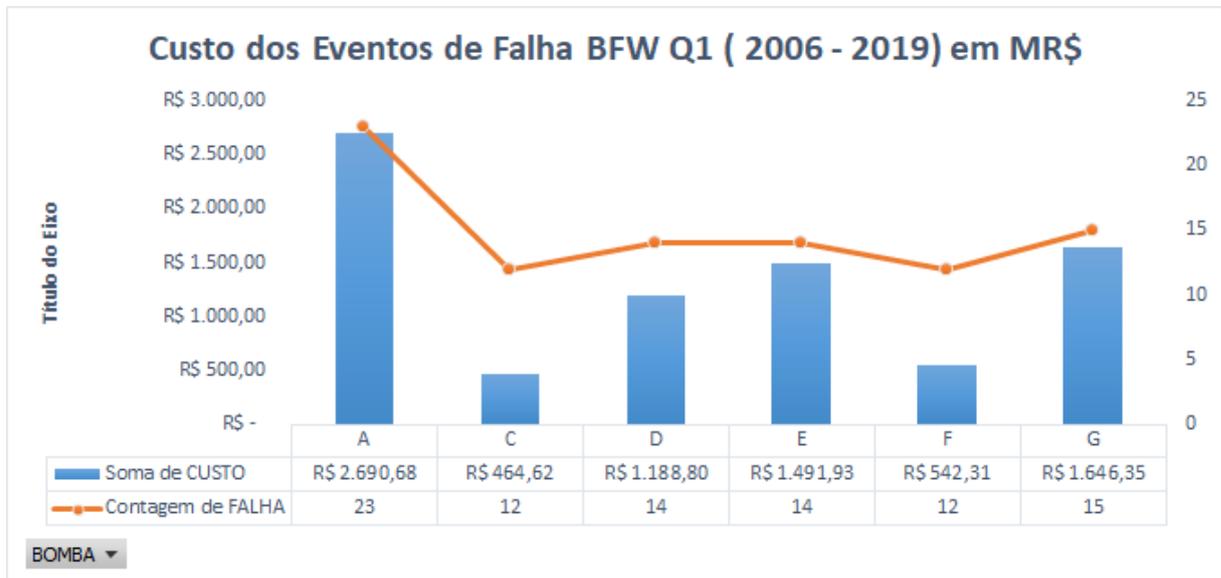
A cavitação ocasiona a formação de bolhas de vapor no corpo líquido, o que acarreta em vibração excessiva. A vibração, por sua vez, em bombas em uma alta frequência pode permitir passagem de vapor no fluido, possibilitando cavitação. Falhas desta magnitude apresentam grande potencial de dano e um enorme custo planejado, devendo ser então monitoradas e tratadas com uma ação imediata para evitar a sua piora em curto prazo.

Uma análise de custo dos eventos de falhas - incluindo os modos de falha citados acima - que ocorreram no período entre 2006 e 2019 nas bombas de BFW (A, C, D, E, F e G) nos permite verificar o quanto já foi gasto com manutenções não planejadas para estas bombas.

O gráfico em questão apresenta um custo médio anual de R\$102.880,69 em reparos corretivos por bomba, onde o custo total com este tipo de manutenção em todo o período estudado passa de R\$ 8.000.000,00.

As bombas que apresentaram maior custo no período avaliado tiveram destaque os modos de falha por vibração e os custos por manutenção geral e parada das turbinas A e G, como mostra a Figura 16 abaixo.

Gráfico 3 - Gráfico de Custo x Tempo



Fonte: Própria, 2019.

Quadro 3 - Principais falhas das turbinas A e G

BOMBA ▾	FALHA ▾	DATA DE INICIO ▾	CUSTO ▾
A	tb-5302A bucha partida na succao	08/08/2007	2.147,44
A	Vv retenção da descarga dando passagem	05/03/2009	100.836,40
A	Válvula de descarga dando passagem	18/03/2009	581,67
A	VAZAMENTO PELO FLANGE DA LINHA DE B.A	20/03/2009	153,50
G	B-5302G Eixo da bomba quebrado	09/12/2011	805.955,51
A	Rolamento do motor da BAO trancado	15/04/2013	334,41
G	M-Preditiva- vibração anormal Resserviço	22/07/2013	299.878,55
A	Manutenção geral	12/09/2013	26.794,42
G	M-preditiva - Vibração anormal	06/06/2016	163.377,88
G	Vibração anormal	12/11/2016	86.700,14
A	Deslocamento axial do eixo da Bomba	30/12/2016	17.616,66
A	PARADA BA01-B-5302A	03/04/2017	1.221.780,59
G	M-preditiva - Vibração anormal	06/07/2017	20.562,05
A	B-5302A - MANUTENÇÃO GERAL	10/03/2018	1.125.263,31
G	M-preditiva - Vibração anormal	07/05/2018	15.098,16
G	Trip por deslocamento axial	10/10/2018	179.334,30

Fonte: Própria, 2019.

6. DETERMINAÇÃO DOS REQUISITOS DO USUÁRIO

A determinação dos requisitos considerados essenciais pelo usuário foi feita após realização de reunião com o cliente e após considerações estabelecidas pelo

grupo, que definiu como premissas itens que englobam segurança, confiabilidade, custo e eficiência dos equipamentos. Abaixo, foram elencados os principais itens evidenciados no decorrer das reuniões para estabelecimento de um escopo condizente com as necessidades do cliente e para classificação da priorização destes itens, como mostrado abaixo:

Quadro 4 - Priorização das Necessidades do Usuário

NECESSIDADES DO USUÁRIO	PRIORIZAÇÃO
Maior Confiabilidade dos Equipamentos	1
Redução dos Custos com Manutenção	2
Redução do MTBF	5
Aumento do MTTR	4
Garantia da Disponibilidade dos equipamentos	3
Operação da bomba com maior eficiência	6

Fonte: Própria, 2019.

7. ANÁLISE SWOT DO PROJETO

Para avaliação do cenário e determinação de um planejamento estratégico do projeto em questão, foi desenvolvida uma análise SWOT ou FOFA, que corresponde a análise de Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças acerca do desenvolvimento e implantação do projeto.

Quadro 5 - Análise SWOT do Projeto

FORÇAS	FRAQUEZAS
Procedimentos Técnicos de Manutenção mais robustos	Disciplina para a execução dos planos de manutenção
Documentação Técnica de Manutenção Preventiva Corporativa	Rastreabilidade de documentação técnica de serviços de manutenção dos equipamentos
Menor Tempo de Rastreabilidade de Falhas	Capacitação de mão de obra própria para execução de manutenção nas bombas de BFW
Diminuição do MTTR (<i>Tempo Médio de Reparo</i>)	Sobressalentes não disponíveis para situações emergenciais
Survey Benchmark Externo e interno	Elevada idade dos equipamentos (indicadores de manutenção comprometidos)
OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
Adequação dos parâmetros de confiabilidade para as condições atuais de operação	Equipamentos fora de linha/mercado
Melhorar eficiência dos equipamentos	Dificuldade de profissionais no mercado com know-how para trabalhar com este modelo de equipamento
Otimização do processo	Imcompatibilidade de peças para reposição no mercado

Fonte: Própria, 2019.

8. REFERÊNCIAS

BHATTACHARYA, Mantosh. **A New Approach To Overcome Of Boiler Feed Water Pump Seizures**. 2015. Disponível em: <<http://oaji.net/articles/2015/1877-1434625097.pdf>>. Acesso em 13 de ago. 2019.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T. ; PRITCHARD, Philip J.; Introdução à Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006. 525 p.

MATTOS, Edson Ezequiel de; FALCO, Reinaldo de. Bombas Industriais. 1ª 1998.

MOTA, Leandro (Braskem). **Análise de confiabilidade:** bombas 5302.

YOSHIKAWA, Shigeru. **Boiler Feed Pump (BFP)**. 2016. Disponível em: <https://www.ebara.co.jp/en/about/technologies/abstract/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/08/24/251_E_P11.pdf>. Acesso em 10 de ago. 2019.

Engineers Edge. **Multi-Stage Centrifugal Pump Review**. Disponível em: <https://www.engineersedge.com/pumps/multi_stage_pump.htm> Acesso em 10 de out. 2019.

GANGHIS, Diógenes. **Apostila de Bombas Industriais**. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/apostila-de-bombas-industriais-1/4861314/>> Acesso em 10 de out. 2019.