



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA CAVITAÇÃO EM TURBOMÁQUINAS
HIDRÁULICAS: BOMBAS CENTRÍFUGAS E TURBINAS HIDRÁULICAS**

**ELENICE DE MATOS SILVA
HELLEN SILVA AUZIER**

**Santarém-Pará
2016**

ELENICE DE MATOS SILVA
HELLEN SILVA AUZIER

**A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA CAVITAÇÃO EM TURBOMÁQUINAS
HIDRÁULICAS: BOMBAS CENTRÍFUGAS E TURBINAS HIDRÁULICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Programa de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Oeste do Pará – Campus de Santarém, para a obtenção do grau de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Ms. Lázaro João Santana da Silva

**Santarém - Pará
2016**

ELENICE DE MATOS SILVA
HELLEN SILVA AUZIER

**A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA CAVITAÇÃO EM TURBOMÁQUINAS
HIDRÁULICAS: BOMBAS CENTRÍFUGAS E TURBINAS HIDRÁULICAS**

TERMO DE APROVAÇÃO

ESTE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO FOI ANALISADO PELOS MEMBROS
DA BANCA EXAMINADORA, ABAIXO ASSINADOS:

APROVADO EM: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Professor Ms. Lázaro João Santana da Silva

Professor Dr. Manuel Roberval Pimentel Santos

Professor Dr. Carlos Célio Sousa da Cruz

Santarém - Pará
2016

Dedicatória

*Eu, Elenice dedico todo o esforço e trabalho aos Meus pais Antonio e Izabel,
Ao meu irmão Anderson,
Aos amigos,
Aos professores que tanto me apoiaram!*

*Eu, Hellen dedico a conclusão dessa fase da minha vida
Aos meus pais Auzier e Maria Chagas,
Aos meus irmãos Hélio, Edmilson e Walax,
E aos professores que me apoiaram!*

Agradecimentos

“Eu, Hellen, sou grata primeiramente a Deus por me conceder sabedoria e persistência, pois só Ele é capaz de suprir as minhas necessidades e ser a fonte da força que eu tenho.

E grata sou pelo apoio que meus pais, Raimundo Auzier e Maria Chagas, me dão diariamente tanto na área acadêmica quanto na vida pessoal. A eles serei eternamente agradecida aos esforços que eles fazem por mim. Vocês dois são pessoas indescritíveis e essenciais, amo vocês.

Muito obrigada também ao meu irmão Hélio, o qual é parceiro e amigo em todos os momentos, é paciente nos meus dias estressantes, me incentivando nos dias difíceis. Agradeço também ao Edmilson e Walax os quais são além de meus irmãos são verdadeiros amigos.

Agradeço a minha parceira e amiga Elenice a qual tenho muito carinho, não apenas por ser companheira neste trabalho, mas por ser uma pessoa iluminada e que eu quero ter sempre por perto.

Agradeço ao nosso orientador, Professor Lázaro, o qual teve uma paciência ímpar conosco, nos repassou seus conhecimentos e seu bom humor durante as reuniões.

Sou grata ao Alexandre por estar comigo nesta trajetória, sendo um companheiro e agora namorado, por me dar sustos enquanto fazíamos provas, por me manter acordada estudando e ser uma das pessoas mais importantes.

Aos meus vizinhos/amigos Dona Gil, Juliana, Emanuelle, Janildo, Henrique agradeço pelas conversas e risadas que me proporcionaram até naqueles dias que eu chegava estressada da Universidade.

Aos professores, sou grata pela contribuição acadêmica e profissional que repassaram em suas aulas. “

“Eu, Elenice, sou completamente e eternamente grata aos meus pais, Antônio e Izabel, que desde o início da carreira acadêmica me apoiaram de todas as formas e com todos os esforços, e a cada dia que passa com mais carinho e esperança, saibam que todos os dias, em tudo que faço, penso em como recompensá-los por tudo.

Agradeço ao meu irmão Anderson, que durante esse período cresceu e está se tornando um grande homem, dedicado e responsável, sendo cada vez mais compreensivo com cada situação.

Aos meus amigos Hellen, Janiclei e Wandesson digo, muito obrigada, obrigada por entrarem na minha vida e fazerem esses últimos anos serem ótimos, obrigada por cada pessoa que são, me ajudando da melhor forma e ensinando quando necessário. Saibam que serão eternamente irmãos postiços.

Obrigada Fábio Ricardo, por ser um companheiro fiel, dedicado, e por toda ajuda. "Obrigado" não é o suficiente para demonstrar o quanto sou grata por lhe ter na minha vida.

Agradeço a todos os professores que fizeram o possível para nos ajudar nos vários momentos complicados na Universidade, que se comportaram como psicólogos ouvindo e conversando com cada aluno, tornando os dias de dificuldade mais vivíveis, e em especial ao professor. "Lázaro, que aceitou o desafio de iniciar esse projeto, compartilhando conosco seus conhecimentos e experiências para que possamos nos tornas ótimas profissionais.

E por fim, agradeço com todas as forças a Deus por ter posto tantas pessoas especiais em minha vida, ter me dado os melhores pais que eu poderia ter, e me oferecer experiências que me tornaram um ser humano mais forte e com vontade de cada vez lutar e vencer mais desafios.

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO	15
2-	OBJETIVOS	17
2.1-	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2-	ESPECÍFICO	17
3-	METODOLOGIA.....	18
4-	TURBOMÁQUINAS.....	19
4.1-	BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	20
4.1.1-	<i>Conceito de Bombas</i>	<i>20</i>
4.1.2-	<i>Conceito de Bomba Centrífuga</i>	<i>20</i>
4.1.3-	<i>O Princípio de Funcionamento de Bombas Centrífugas.....</i>	<i>21</i>
5.	TURBINAS HIDRÁULICAS.....	23
5.1.1-	<i>TIPOS DE TURBINAS</i>	<i>25</i>
6.	CAVITAÇÃO.....	32
6.1.	NÍVEIS DE CAVITAÇÃO	36
6.2.	TIPOS DE CAVITAÇÃO	38
6.3.	IMPACTOS DECORRENTES DA CAVITAÇÃO	42
7.	CAVITAÇÃO EM TURBOMÁQUINAS	45
7.1.	CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS	45
7.1.1-	<i>NPSHrequerido</i>	<i>47</i>

7.1.2-	<i>NPSHdisponível</i>	48
7.2.	CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS	48
8.	MÉTODOS DE ANÁLISE E MONITORAMENTO DA CAVITAÇÃO	51
8.1.	TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA NA ANÁLISE E MONITORAMENTO DE CAVITAÇÃO	51
8.1.1-	<i>Fundamentos De Acústica</i>	52
8.1.2-	<i>Emissão Acústica</i>	52
8.1.3-	<i>Principais Parâmetros Da Técnica Da Emissão Acústica</i>	54
8.1.4-	<i>Deteção e Equipamentos Necessários</i>	56
8.2.	TÉCNICA DE VIBRAÇÃO NA ANÁLISE E MONITORAMENTO DOS EFEITOS DA CAVITAÇÃO	58
9.	MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DANIFICADOS PELA CAVITAÇÃO	60
10.	CONCLUSÃO	71
11.	REFERÊNCIAS	73

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Bomba Centrífuga em Corte	22
FIGURA 02 - Turbinas Kaplan. (a) Turbina Kaplan real. (b) Esquema estrutural turbina Kaplan	26
FIGURA 03 - Turbinas Pelton. (a) Turbina Pelton real. (b) Esquema estrutural turbina Pelton	28
FIGURA 04 - Turbinas Francis. (a) Turbina Francis Real. (b) Esquema Estrutural Turbina Francis	29
FIGURA 05 - Gráfico Representativo Campo Típico de Aplicação das Turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo.	30
FIGURA 06 - Apresentação de colapso de uma bolha próxima de uma superfície solida e o gráfico da pressão na bolha	33
FIGURA 07 - Esquema do colapso de uma bolha próximo a uma superfície em três situações características ..	33
FIGURA 08 - Curva do fator de Thoma X Velocidade específica.	36
FIGURA 09 - Resultados dos sinais da energia total (parte superior) e contagem AE (parte inferior da figura) X Tempo	38
FIGURA 10 - Representação de fluxo do fluido nas pás de uma turbina Francis com vetor de velocidade atuante.	40
FIGURA 11 - (a) Formação da cavitação e (b) Erosão devido à cavitação do bordo de ataque de pá.	41
FIGURA 12 - Cavitação em vórtice numa turbina Francis.	42
FIGURA 13 - Pás com erosão devido à cavitação	43
FIGURA 14 - Rotor de bomba centrífuga danificado por erosão causado por cavitação.	43
FIGURA 15 - Influência da cavitação nas curvas da bomba	46
FIGURA 16 – Cavitação em bolhas	49

FIGURA 17 - Efeito da cavitação em pás de rotor.....	49
FIGURA 18 - Corrosão na palheta da turbina e eixo inferior	50
FIGURA 19 - Princípio da técnica de Emissão Acústica.	53
FIGURA 20 - Curva típica de sinais de Emissão Acústica obtida nos ensaios.	54
FIGURA 21 - Sinais de Emissão Acústica coletados na turbina 21F da Usina de Gezhouba (a) antes do reparo e (b) após o reparo da erosão causada pela cavitação	57
FIGURA 22 – Soldagem por Pressão.....	62
FIGURA 23 – Soldagem por Fusão.....	63
FIGURA 24 – Processo por Soldagem TIP.....	64
FIGURA 25 - Processo de Soldagem por Aspersão Térmica.	65
FIGURA 26 – Diagrama Com Materiais E Processos Da Aspersão Térmica.	67
FIGURA 27 – Roboturb	69
FIGURA 28 – (A) Pá Após Recuperação De Borda Superior E (B) Área Do Arco De Descarga Sendo Tratado Pelo Processo De Solda Elétrica	69

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 01 - Número de Cavitação	34
EQUAÇÃO 02 - Coeficiente de cavitação da instalação	34
EQUAÇÃO 03 – Rotação Específica	35
EQUAÇÃO 04 – Rotação Específica	35
EQUAÇÃO 05 - Amplitude de Emissão Acústica	64
EQUAÇÃO 06 - RMS	64

RESUMO

Grande parte da energia elétrica consumida no país advém de usinas hidrelétricas, com uma significativa e crescente demanda energética. Para cumprir as demandas de energia as usinas hidrelétricas estão trabalhando no limite máximo, favorecendo o aparecimento de problemas de vários tipos, como o fenômeno da cavitação. Esse processo produz consequências negativas nos equipamentos hidráulicos como ruídos, vibração das estruturas, redução da potência e da eficiência dos equipamentos, instabilidade no escoamento do fluido e o mais agravante: a erosão, sendo este um dos agravos mais nocivos que ocorre nos equipamentos hidráulicos, devido ocasionar problemas estruturais e perdas econômicas, em razão de deixar as máquinas inoperante periodicamente, para serviços de reparo, manutenção e até substituição parcial ou total do equipamento.. Em geral, as turbomáquinas, devido a livre circulação das bolhas imersas no fluido que escoam pelos canais internos das mesmas, ficam vulneráveis à cavitação, pois ela pode ocorrer em quaisquer superfícies da estrutura ou das pás. O estudo procurou identificar técnicas de análise e monitoramento da cavitação em máquinas hidráulicas como exemplo, pode-se citar: o método acústico que envolve a medição do som, por meio de sensores e pré-amplificadores, que se propaga no fluido transmitindo a sua energia acústica à estrutura, dessa forma, possibilitando a medição do som, com o tratamento desses dados, realiza-se uma supervisão do equipamento, com a análise disso, pode-se evitar o desenvolvimento ou a expansão do fenômeno; outro método é o de vibração que se dá por monitoramento dos sinais obtidos através de sensores captadores da energia associado ao processo de vibração os quais transformam a energia mecânica de vibração em sinais elétricos, com os dados obtidos é possível fazer comparações com os de fábricas ou anteriores e, assim identificar se houve algum esforço dinâmico novo. Além disso, medidas podem ser tomadas ainda na fase de projeto do sistema. Nas bombas, o cálculo do NPSH faz uma previsão da margem de segurança contra os efeitos da cavitação. Pode-se evitar a ocorrência da erosão, para isto é necessário manter o equipamento nas condições de operação em torno do seu ponto de projeto. Caso ocorra erosão por cavitação, o processo de soldagem pode recuperar as partes danificadas, preenchendo os buracos e reconstituindo os contornos. É importante fazer manutenções

frequentes, no tempo adequado, ressaltando que um custo levemente superior na fase de projeto economizará muito trabalho duro e custo de manutenção.

Palavras-chave: energia elétrica, turbomáquinas, cavitação, erosão.

ABSTRACT

Much of the electricity consumed in the country comes from hydroelectric plants, with a significant and growing energy demand. To meet the energy demands hydroelectric plants are working at the maximum limit, favoring the appearance of problems of various kinds, such as cavitation. This process produces negative consequences in hydraulic equipment such as noise, vibration of structures, reducing power and equipment efficiency, instability in the flow of the fluid and the most aggravating: erosion, which is one of the most harmful diseases that occur in the hydraulic equipment, due cause structural problems and economic losses due to leave dead machines periodically for repair, maintenance and even partial or complete replacement of the equipment .. in general, turbomachinery, because the free movement of bubbles immersed in the fluid flowing the internal channels of the same, are vulnerable to cavitation because it can occur in any area of the structure or the blades. The study aimed to identify techniques for analysis and monitoring of cavitation in hydraulic machines as an example, we can mention: the acoustic method involving sound measurement by means of sensors and preamplifiers, which propagates in the fluid transmitting its energy acoustic structure, thereby enabling the measurement of sound with those data it holds a supervisory equipment, the analysis also can prevent the development or expansion of the phenomenon; Another method is the vibration that occurs by monitoring the signals obtained by sensors energy associated with the vibration process which transforms the sensors mechanical vibration energy into electrical signals, with the data obtained it is possible to make comparisons with plants or earlier and thus identify if there were any new dynamic effort. In addition, measures can be taken in the system design phase. The pumps, the calculation of NPSH makes a prediction of the safety margin against the effects of cavitation. Can prevent the occurrence of erosion, it is necessary to keep the equipment in operating conditions around its design point. In the event of cavitation erosion, the welding process can recover the damaged parts, filling the holes and reconstituting the contours. It is important to make frequent maintenance at the right time, noting that a slightly higher cost in the design phase will save a lot of hard work and maintenance cost.

Keywords: energy electricity, turbomachinery, cavitation, erosion.

1- INTRODUÇÃO

As turbomáquinas são equipamentos de grande importância em instalações industriais nas áreas de geração de energia, química, de bebidas, de oleoduto, de gás natural líquido, de petróleo, de transformações e outras. Esses equipamentos apresentam-se como turbinas, compressores, sopradores, ventiladores, etc., podem assumir uma ampla faixa de geração ou consumo de potência e de velocidade. Em geral estão acopladas a um gerador (turbinas) ou a um motor elétrico (bombas e ventiladores). Quando em funcionamento, o desempenho das turbomáquinas representam um dos parâmetros mais significativos desses equipamentos e, basicamente, tem resultado direto sobre a geração ou consumo de energia. No Brasil, a capacidade própria instalada total de geração de energia elétrica atingiu 134.008 MW em janeiro de 2015, com a fonte hidráulica sendo a maior produtora de energia elétrica, produzindo cerca de 3.277 MW, em comparação a fontes térmicas que foram responsáveis por 1.429 MW, e 2.729 MW das de geração eólica, no mesmo período no ano de 2014 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015). Esse aumento de produção vem para suprir o aumento da demanda de energia, segundo o planejamento energético nacional prevê, para o período de 2013-2022 (PDE, 2014), um crescimento na demanda de eletricidade em 4,7% a.a, o que requer, para o mesmo período, um crescimento de 56% da capacidade instalada de geração de energia elétrica nacional, na qual a energia proveniente da fonte hidráulica contribuirá com 54% desse crescimento (P&D, ANEEL, 2015). O resultado desse aumento da demanda e das usinas hidrelétricas trabalhando de forma a forçar as turbinas tem como consequência efeitos indesejáveis, como erosão das pás motrizes, vibrações, ruídos excessivos, diminuição da eficiência das turbinas hidráulicas, aumento dos custos de reparo, perda de energia gerada por indisponibilidade das máquinas, limitação da flexibilidade operacional do sistema, redução da vida útil dos equipamentos afetados, e o aparecimento da cavitação, que é um dos problemas mais agravantes enfrentados pelas Usinas Hidrelétricas e por instalações hidráulicas, gerando diversos impasses que provocam perdas: de material; financeiras; de desempenho e energéticas.

A cavitação é um fenômeno físico que se inicia com a formação de bolhas de vapor em um meio líquido, em geral água, onde o nível de pressão é favorável ao processo, as bolhas então são transportadas de um ponto para o outro devido à diferença de pressão e, ao se locomoverem para uma região de alta pressão estouram por implosões e explosões. Esse processo produz consequências negativas nos equipamentos hidráulicos como ruídos, vibração das estruturas, redução da potência e da eficiência dos equipamentos, instabilidade no escoamento do fluido e o mais agravante: a erosão, sendo uma das principais causas de falhas nesse tipo de equipamentos.

A prevenção da cavitação vem desde o projeto da máquina, com cálculos precisos, preparando o equipamento para diversas situações que possam vir a ocorrer. Tanto as bombas centrífugas quanto as turbinas hidráulicas possuem dados, a cerca de suas variações e de seus limites. No momento da seleção do equipamento deve ser escolhida uma máquina adequada, obedecendo todos os parâmetros, para que, no decorrer do seu funcionamento não apresente falhas que poderiam ter sido prevenidas anteriormente. Os equipamentos hidráulicos podem ser críticos no ambiente de produção. Fazer o estudo das condições que podem provocar a cavitação nestes aparelhos pode inibir a incidência do fenômeno. Em equipamentos que funcionam em condições de operação variável, é possível que em algum ponto possam ocorrer condições propícias à ocorrência de cavitação, sendo, portanto, nesse caso, necessário monitorar e controlar sua ocorrência através de métodos de análise, evitando que isso possa provocar um alto grau de erosão, tendo como consequência perdas – que podem chegar a ser totais - no/do equipamento. Dessa forma, justifica-se o estudo desse fenômeno e os métodos de como evitar, prever e controlá-lo o que pode contribuir para prolongar a vida útil do equipamento e reduzir prejuízos indesejáveis.

2- OBJETIVOS

2.1- OBJETIVO GERAL

Estudar os efeitos da cavitação em turbomáquinas hidráulicas e seus mecanismos de controle e monitoramento.

2.2- ESPECÍFICO

- ✓ Caracterizar os impactos do fenômeno de cavitação;
- ✓ Descrever e analisar os efeitos da cavitação em turbinas hidráulicas e bombas centrífugas.
- ✓ Identificar e descrever métodos de análise e monitoramento da cavitação;
- ✓ Citar e descrever métodos de recuperação dos danos causados pela cavitação.

3- METODOLOGIA

Inicialmente, o objetivo deste trabalho era verificar a ocorrência de cavitação nas turbinas hidráulicas da Usina de Curuá – Una, com obra baseada em pesquisas bibliográficas e análise de dados de campo. A idéia de desenvolver esse tipo de pesquisa foi muito bem recebida, resultando em um apoio total dos representantes da Hidrelétrica, com compartilhamento de dados das turbinas hidrelétricas da usina, e conteúdos sobre o fenômeno da cavitação, além de permissões para visitas na empresa Eletronorte Santarém. Infelizmente, o trabalho não pôde ter prosseguimento, por conta de incompatibilidade de agenda, de ambas as partes, nos forçando a mudar de foco. Então, a partir desse momento, a pesquisa para o desenvolvimento do trabalho passou a se basear completamente em conteúdos teóricos. Para dar início a essa nova fase, fez-se um brainstorming, onde foram organizadas idéias para o novo plano de trabalho, de forma a facilitar o levantamento da bibliografia necessária. Essa listagem se iniciou com alguns artigos, teses, catálogos, normas técnicas, portais on-line de empresas e de sites relacionados ao assunto, relatórios e imagem, dentre elas algumas disponibilizadas pela Usina de Curuá-Una. Após isso, foi feita uma averiguação para fazer a separação dos materiais que seriam úteis para o trabalho, e os demais foram reservados para uso futuro, em seguida, os arquivos escolhidos foram organizados por: TÍTULO DA OBRA, NOME DO(S) AUTOR(ES) E DATA, facilitando o desenvolvimento do trabalho. De acordo com a necessidade, mais pesquisas eram feitas em buscas de novos arquivos. Todo o trabalho durou cerca de um ano, dentre pesquisas, reunião com o orientador e escrita do TCC.

4- TURBOMÁQUINAS

As turbomáquinas são um tipo de máquinas de fluxo que operam com fluido contínuo escoando através de palhetas fixadas no rotor, e a transferência de energia ocorre pela variação da quantidade de movimento nas seções de escoamento do fluido, e podem desempenhar a função tanto de bomba quanto de turbina, segundo SIMÃO (2009). Quando trabalha como bomba a máquina recebe de um motor elétrico energia que transmite mecanicamente ao seu meio, fornecendo energia para o fluido à medida que este escoar continuamente pelo interior de suas palhetas e, quando trabalho como turbina, máquina recebe energia do escoamento e fornece a energia mecânica ao exterior, a um gerador, permitindo a produção de energia elétrica. PINTO (2010), cita que estas máquinas podem ser classificadas quanto à compressibilidade do fluido de trabalho (turbomáquinas térmicas e hidráulicas), ao sentido da transferência de energia (turbomáquinas motora e geradora), e quanto à geometria do percurso do fluido (turbomáquinas radiais e axiais). Em função do objetivo do presente trabalho, será dado ênfase nas turbomáquinas hidráulicas, visto que a cavitação é um fenômeno de ocorrência limitada a líquidos.

As turbomáquinas hidráulicas usam em seu funcionamento um fluido incompressível, ou seja, com variação praticamente desprezível na massa específica, e promovem transformações de energia mecânica em hidráulica ou vice-versa, dependendo do sentido de transmissão. Podem ser classificadas de acordo com suas diferentes características, podendo ser bombas centrífugas ou turbinas hidráulicas, segundo SIMÃO (2009). As que transformam energia hidráulica do fluxo de água em energia mecânica são conhecidas como turbinas hidráulicas. As que empregam as forças centrífugas para transferirem energia de uma determinada fonte para um líquido chamam-se bombas centrífugas. (APOSTILA DE BOMBAS, [s.d.]

4.1- BOMBAS CENTRÍFUGAS

4.1.1- Conceito de Bombas

Segundo ELETROBRÁS (2009), bombas são máquinas receptoras hidráulicas que, através de uma fonte motora, recebem energia transformando-a em energia cinética e em energia de pressão, a transmitem ao fluido, fazendo este fluido deslocar-se de um ponto para outro, inclusive vencer desníveis existentes no decorrer da instalação. A utilização de bombas ocorre sempre que se necessita aumentar a pressão de um fluido, transportá-lo pela tubulação de um ponto a outro de uma planta industrial ou de um sistema de abastecimento, seguindo as condições de vazão e pressão estabelecidas pelo processo.

Existem diversos tipos de bombas, cada uma com características adequadas a uma determinada condição que o processo exige, porém, as bombas mais utilizadas na indústria do petróleo são bombas centrífugas, também conhecidas como bombas dinâmicas centrífugas ou turbo-bombas (ELETROBRÁS, 2009).

Neste trabalho a cavitação será apresentada especificamente em bombas centrífugas, para isto é necessário conhecer o conceito, partes e o funcionamento deste tipo de turbomáquina.

4.1.2- Conceito de Bomba Centrífuga

A bomba centrífuga é um equipamento mais usual para transferência de líquidos, segundo informações de Tretalon, empresa de soluções para fluidos, tendo aplicações domésticas e em inúmeros processos que envolvem bombeamento à altas vazões em atividades industriais. É aquela que trabalha transferindo energia cinética para o fluido, através do emprego de forças centrífugas, transformando-a em energia potencial. As bombas centrífugas possuem pás cilíndricas, com geratrizes paralelas ao eixo de rotação, sendo essas pás fixadas a um disco e à uma coroa circular, compondo o rotor da bomba. Essas bombas são utilizadas amplamente na indústria para transporte de fluidos devido a sua flexibilidade operacional.

4.1.3- O Princípio de Funcionamento de Bombas Centrífugas

Uma bomba centrífuga opera, segundo LOPES (2011), “transferindo energia cinética para o fluido e transformando-a em energia potencial, seja esta de posição ou, mais frequentemente, de pressão no bocal de descarga da bomba”. E isso acontece devido ao emprego dos conceitos do Princípio de Bernoulli.

Nas bombas centrífugas existem três partes principais: o rotor, também chamado de impelidor ou impulsor, é o órgão responsável por impulsionar o líquido; a carcaça, que envolve o rotor e é a parte que mantém o líquido dispondo de bocais de entrada (sucção) e saída (descarga) do fluido, e o eixo que ao atravessar a carcaça conecta-se ao rotor, fornecendo movimento rotativo (GOUVEA,2008). Abaixo, a Figura 1 apresenta uma representação da bomba centrífuga em corte.

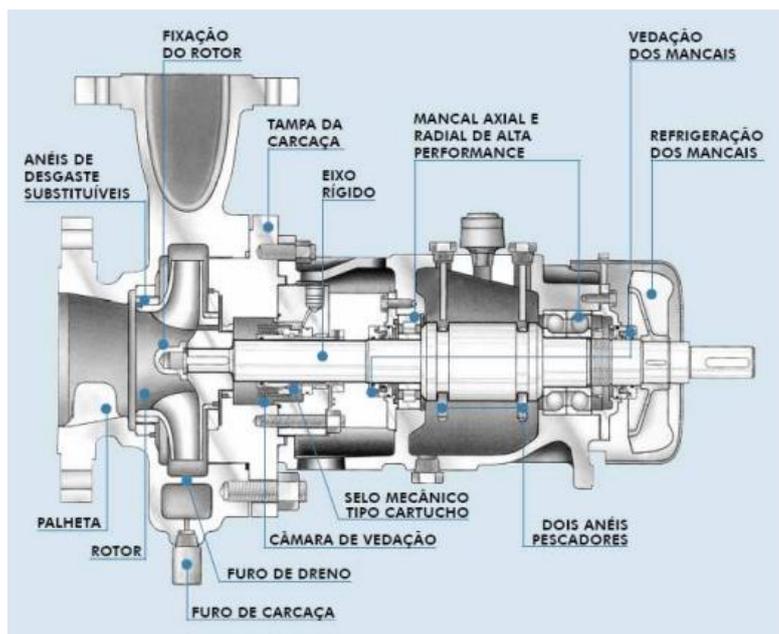


Figura 1 - Bomba Centrífuga em corte.

FONTE: Estudo de confiabilidade em Bombas Centrífugas (GOUVEA, M. M. R. de 2008).

Este tipo de bomba tem como princípio de funcionamento a criação de duas zonas de pressão: uma de baixa pressão na sucção e outra de alta pressão na descarga (recalque). GOUVEA (2008) descreve como este procedimento acontece:

“Na partida é necessário que a carcaça da bomba e tubulação de sucção estejam totalmente preenchidas com o líquido a ser bombeado. O enchimento da carcaça da

bomba e a tubulação de sucção é chamado de escorva. O movimento rotativo do rotor faz com que as partículas de líquido sejam impulsionadas para fora. Esse movimento centrífugo cria um “vácuo” na entrada (baixa pressão) e um “acúmulo” na saída (alta pressão) pela redução da velocidade com o aumento de volume na carcaça (no difusor ou pás difusoras). A baixa pressão succiona novas partículas vindas da sucção, estabelecendo um fluxo contínuo de líquido. A alta pressão permite que o líquido vença as perdas impostas pela tubulação e seus acessórios. ”

5. TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas hidráulicas são um dos tipos de máquinas hidráulicas, sendo assim, trabalham de maneira a promover a troca de energia hidráulica, que recebem de uma queda de fluido disponível, em energia mecânica. Nesse tipo de máquinas, o movimento do fluido é executado por forças que, por meio de uma velocidade de rotação, tornam a energia mecânica disponível ao veio do rotor e em receptoras (bombas e ventiladores que se comportam de modo inverso) resultando em energia elétrica (SIMÃO, 2009).

As turbinas têm princípios de funcionamento básicos, como o trabalho do fluido (água) no equipamento, que se inicia com a água entrando na turbina vinda de um reservatório ou de um nível mais alto e escoando para um canal de nível mais baixo, e mais adiante sendo conduzida por um duto fechado até um conjunto de palhetas ou injetores que transferem a energia mecânica do fluxo de água em potência de eixo, sendo direcionada a um duto até um canal inferior. Ao fim deste percurso a pressão e a velocidade da água são menores que na entrada (JÚNIOR, 2013). Em adicional, BARBOSA (2006) diz que, “parte da pressão provinda da água é responsável pelo seu aumento de velocidade dentro do distribuidor, de modo que ela ainda possua energia de pressão quando em contato com as pás do rotor”, e esse acréscimo de velocidade, quando em contato com as pás, é responsável pela rotação do eixo da turbina.

JÚNIOR (2013) esclarece que, para um funcionamento adequado da turbina alguns componentes são essenciais como o distribuidor, que direcionar a água para o rotor por uma direção adequada, modifica a vazão, indo de zero até a abertura máxima, além de transformar total ou parcialmente a energia de pressão em energia cinética na entrada do rotor; Rotor ou roda, que transforma grande parte da energia hidráulica em trabalho mecânico; Difusor ou tubo de sucção, que apresenta as seguintes funções: recuperar a altura entre a saída da roda e o nível

do canal de fuga e recuperar parte da energia cinética correspondente a velocidade residual da água na saída da roda; e a Carcaça, que conduz a água do conduto forçado até o distribuidor.

Mesmo apresentando fatores em comum, as turbinas também têm suas particularidades, o que é importante, devido a necessidade de aplicação desses equipamentos em diferentes condições de operação. Sendo assim, a ABNT NRB 6445 classifica as turbinas hidráulicas em:

- **Turbinas de ação:** aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela obtenção da energia cinética da água em escoamento através do rotor. Exemplo desse tipo de turbina são as turbinas Pelton.
- **Turbinas de reação:** aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinéticas e de pressão da água em escoamento através do rotor. Exemplo desse tipo de turbinas são as turbinas Kaplan e Francis.

JÚNIOR (2013) ressalta que essa classificação se dá pela variação da pressão estática. Na primeira (ação), a pressão na tubulação cai até a pressão atmosférica logo que a água sai do distribuidor, fazendo a energia cinética aumentar na passagem de saída do distribuidor e perde intensidade ao atingir as pás, de modo que, a velocidade da água ao sair da pá é menor do que quando a atingiu. Na segunda (reação), a energia de pressão cai desde a entrada do distribuidor até a saída do receptor, aumentando no difusor. Este autor apresenta uma classificação para as turbinas em função da direção do fluxo através do rotor, que pode ser:

- Radial: o fluxo é aproximadamente perpendicular ao eixo de rotação;
- Axial: o fluxo é aproximadamente paralelo ao eixo de rotação;
- Tangencial: o fluxo de água é lançado sob a forma de um jato sobre um número limitado de pás e;
- Diagonal: o fluxo muda gradativamente da direção radial para a axial.

De acordo com essas classificações, a seguir são apresentados alguns tipos de turbinas, cada uma adequada para uma determinada faixa de altura de queda e vazão volumétrica.

5.1.1- TIPOS DE TURBINAS

Os tipos mais comuns utilizados no Brasil e no mundo são as Turbinas Kaplan, Pelton e Francis. A seguir, uma apresentação mais detalhada sobre esses a estrutura desses equipamentos e seu funcionamento.

Turbinas Kaplan

As turbinas Kaplan foram criadas pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934). A Figura 2 apresenta uma turbina Kaplan. Essas turbinas foram criadas a partir das turbinas tipo Hélice, mas com a possibilidade de variar o passo das pás, ajustado através de um servomotor hidráulico instalado no núcleo do rotor, isso torna possível manter um alto rendimento sobre uma ampla faixa de alturas de queda e aberturas do distribuidor em condição de funcionamento.

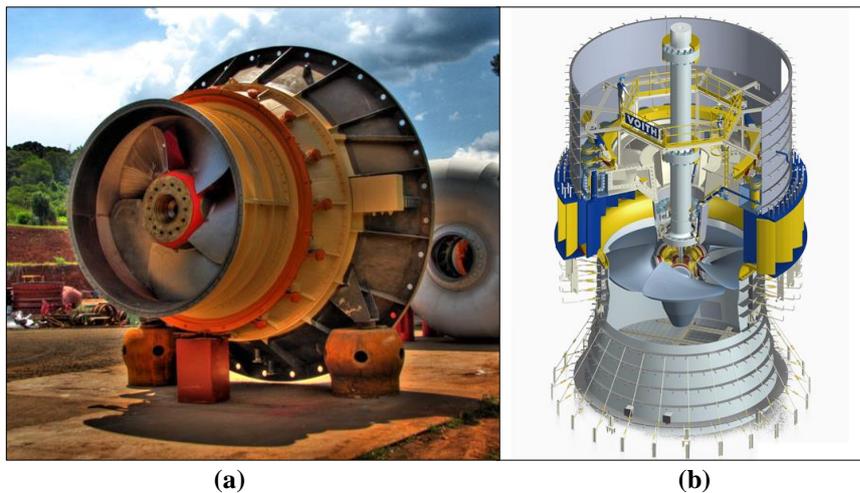


Figura 2 - Turbinas Kaplan. (a) Turbina Kaplan real. (b) Esquema estrutural turbina Kaplan.

FONTE: (a) http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_kaplan_turbinas.php.

(b) <http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-kaplan-560.htm>

Dessa forma, permite-se a aplicação dessas turbinas em uma ampla faixa de condição de operações. É importante relatar que a relação correta entre o ângulo das pás do rotor e a vazão de água através do distribuidor da turbina e é determinada por um mecanismo de cames, operado por um servomotor que por sua vez é comandado a partir de um regulador de

velocidade (COSTA, 2003). COSTA (2003) ainda enfatiza que este mecanismo é de grande utilidade pois, como as turbinas Kaplan operam em grandes vazões e baixas quedas, quando ocorre uma variação do nível de altura de água nos reservatórios, ele atua compensando essas variações, possibilitando flexibilizar o funcionamento desse tipo de turbina e manter uma eficiência sobre uma faixa ampla de condições de operação.

“[...] As vantagens do alto rendimento em quedas médias e baixas com alto volume de água e o crescente número de unidades instaladas com sucesso fizeram com que as turbinas Kaplan se tornassem uma ótima opção para as Pequenas Centrais Hidrelétricas. [...]” (MERIGUE & SILVA, 2013).

Os principais componentes dessa turbina são:

- **Distribuidor:** Se assemelha ao das turbinas Francis, tendo as mesmas finalidades. As pás do distribuidor, tem sua inclinação comandada por um sistema análogo ao das turbinas Francis, e ficam a uma distância considerável das pás do rotor. Deve haver uma sincronização entre os ângulos das pás do rotor e as do distribuidor;
- **Rotor:** Como citado anteriormente, possui pás que podem ser ajustáveis variando o ângulo de acordo com a demanda de potência;
- **Tubo de Sucção:** Tem as mesmas finalidades e a mesma forma dos tubos de sucção para turbinas Francis;
- **Caracol ou Caixa de Espiral:** Pode ter seção transversal circular nas turbinas de pequena capacidade e nas quedas consideradas relativamente grandes para turbinas Kaplan, mas, nas unidades para grandes descargas e pequenas quedas, a seção é aproximadamente retangular ou trapezoidal com estreitamento na direção do distribuidor e recebe a denominação de semicaracol.

O eixo dessa turbina é geralmente posicionado na vertical, mas em alguns casos, como nas máquinas de baixa potência que operam com alturas de queda muito pequenas, esse eixo é posicionado na horizontal. Seu rotor tem, geralmente, de quatro a seis pás, mas para aplicação em alturas de queda maiores esse número pode aumentar (COSTA, 2003).

Turbinas Pelton

A Figura 3 apresenta uma turbina Pelton.

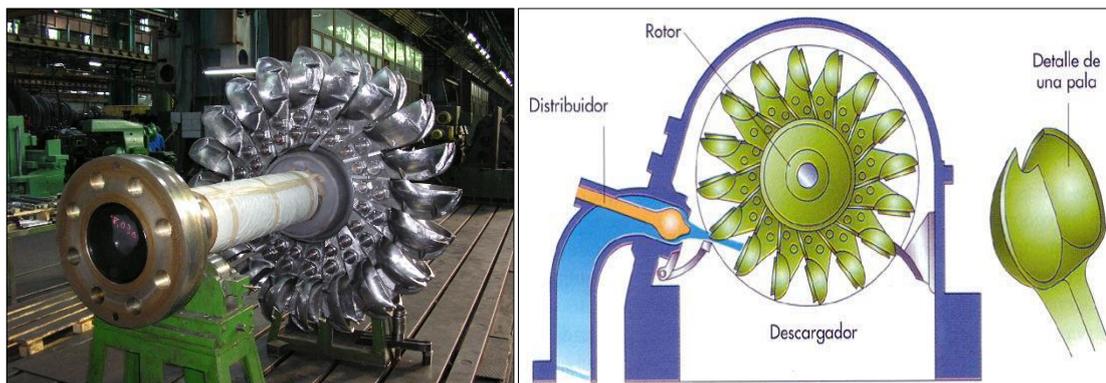


Figura 3- Turbinas Pelton. (a) Turbina Pelton real. (b) Esquema estrutural turbina Pelton.
FONTE: (a) http://www.generalturbo.eu/images/dotari/turbina_pelton.JPG. (b) http://members.tripod.com/mqhd_ita.mx/u3.htm

Essas turbinas são, geralmente, utilizadas em usinas com grandes alturas d'água, maior que 250 m (COSTA, 2003). JÚNIOR (2013) cita que esta turbina pode ser instalada em quedas bem pequenas, mas gera apenas algumas dezenas de cv. Possui um rotor que tem pás no formato de conchas e são presas na periferia de um disco que gira em torno de um eixo. Seu distribuidor tem o formato de um bocal injetor que gira o fluxo d'água produzindo um jato sobre as pás do rotor (JÚNIOR, 2013).

“ [...] O injetor é dotado de um defletor que, em caso de anulação brusca da potência pedida à turbina, desvia o jacto da roda, tornando, assim possível que o injetor feche lentamente, sem originar altas sobre pressões devidas ao golpe de aríete, nem sobre velocidades indesejáveis de rotação do grupo, [...]. “ (QUINTELA, 2005 apud SIMÃO, 2009).

Os principais componentes dessa turbina são:

- **Distribuidor:** É um bocal de forma apropriada a guiar a água, proporcionando um jato cilíndrico sobre a pá do receptor, o que é conseguido por meio de uma agulha;
- **Rotor:** Consta de um certo número de pás com forma de concha especial, dispostas na periferia de um disco que gira preso a um eixo.

- **Defletor de jato:** O defletor intercepta o jato, desviando-o das pás, quando ocorre uma diminuição violenta na potência demandada pela rede de energia. Nessa hipótese, uma atuação rápida da agulha para reduzir a descarga poderia vir a provocar uma sobre pressão no bocal, nas válvulas e ao longo do encanamento adutor. O defletor volta à sua posição inicial liberando a passagem do jato, logo que a agulha assume a posição que convém, para a descarga correspondente à potência absorvida.
- **Bocal de frenagem:** Faz incidir um jato nas costas das pás, contrariando o sentido de rotação, quando se desejar frear a turbina rapidamente.

O eixo dessa turbina é geralmente posicionado na horizontal, com seu gerador montado ao seu lado, segundo COSTA (2003). Essa posição é utilizada para um ou dois jatos, e quando instalado na vertical, utiliza-se quatro ou seis jatos nas pás do rotor (QUINTELA, 2005 apud SIMÃO, 2009). Quanto maior o número de jatos, maior a potência para uma mesma queda, menor o tamanho do rotor, e infelizmente aumenta-se o desgaste por abrasão, pois há o risco de ter areia em suspensão na água.

Turbina Francis

A Figura 4 apresenta uma turbina Francis.

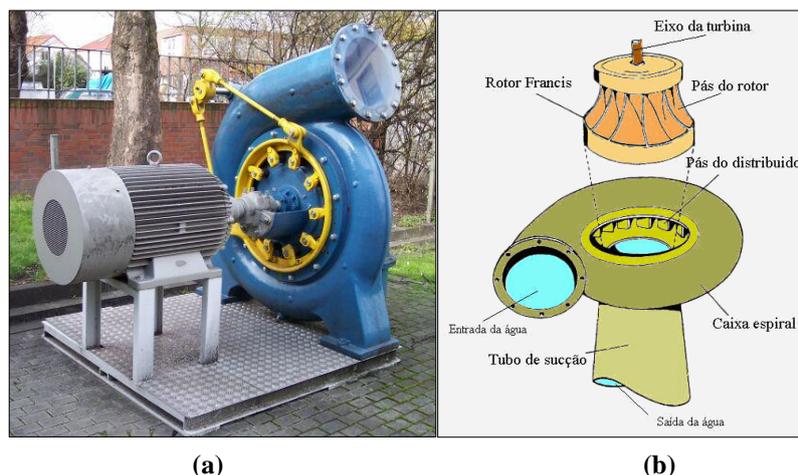


Figura 4- Turbinas Francis. (a) Turbina Francis real. (b) Esquema estrutural turbina Francis.

FONTE: (a)

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Francis_Turbine_complete.jpg.

(b) <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%E1ulicas/CAP%20TULO%203REV.htm>

Esta turbina funciona com uma diferença de pressão entre os dois lados do rotor e utilizam um tubo de sucção para conduzir a água de uma maneira contínua, e não livre na atmosfera, até o poço. O uso do tubo de sucção para direcionar a água proporciona um aumento da energia cinética na saída do rotor e um ganho do desnível topográfico entre a saída do rotor e o nível da água do poço, e “a distribuição da água sobre as pás do rotor é feita por meio de pás diretrizes”. (JÚNIOR, 2013).

“Neste projeto, a água sob pressão entra em um condutor em espiral (“caracol”) que circunda as pás móveis e flui através de pás fixas na direção radial para o interior da turbina. A água então passa pelo rotor no sentido descendente, exercendo pressão contra as pás móveis, desta forma acionando o rotor da turbina. O gerador normalmente é acionado pelo próprio eixo da turbina, [...]” (COSTA, 2003).

As principais componentes dessa turbina são:

- **Caixa:** que tem forma de caracol do tipo fechado, a qual é substituída por uma câmara ou poço de educação no tipo aberta;
- **Distribuidor:** contém pás orientáveis que proporcionam a descarga correspondente à potência demandada, com o ângulo mais adequado para a entrada da água no rotor;
- **Rotor:** que contém pás com formato especial;
- **Tubo de Sucção:** o qual conduz a água que sai do rotor a um poço ou canal de fuga.

As turbinas Francis podem ter o eixo posicionado na vertical ou na horizontal, e um dos seus únicos inconvenientes é a variação da curva de rendimento com a vazão (JUNIOR, 2000 apud MERIGUE, 2013). A Figura 5 expõe um gráfico com o campo típico de aplicação dos três tipos de turbinas que foram citadas anteriormente e da turbina Bulbo.

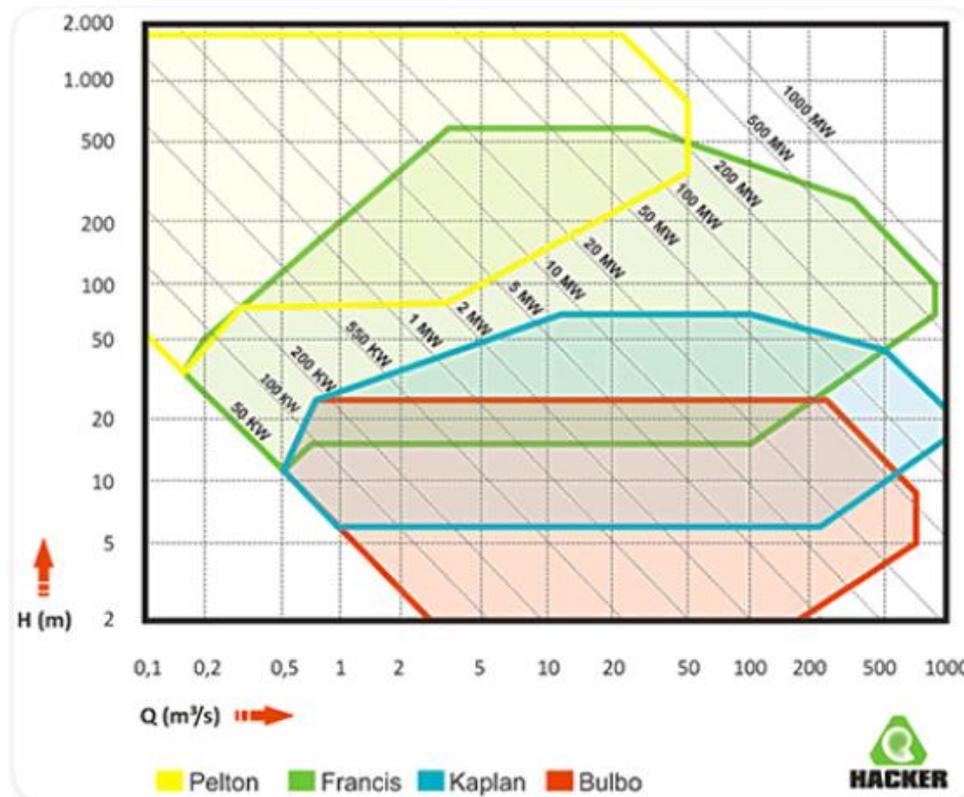


Figura 5 - Gráfico representativo campo típico de aplicação das turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo.

FONTE: Hacker, turbinas hidráulicas e equipamentos (2016).

ALVES (2007, apud MERIGUE, 2013) apresenta outro tipo de turbina: a Turbina Bank. Também conhecida como turbina de fluxo cruzado, funciona como uma turbina de ação e é, geralmente, instalada em quedas menores, mas com maiores volumes d'água. De acordo com BETTA HIDROTURBINAS (2011, apud MERIGUE, 2013), esta tem um rotor tipo tambor, com pás em formatos de lâminas e com perfil hidráulico regulador de vazão. Nesse modelo de turbinas o fluxo de água é direcionado, semelhante as turbinas Pelton.

Outros tipos de turbinas podem ser encontrados além das já citadas, como as **Turbinas Dérias**, que são semelhantes às turbinas Kaplan e Francis rápida, mas com pás do rotor articuladas que podem variar seu ângulo de inclinação pela atuação de um mecanismo apropriado; **Turbinas Tubulares**, que podem ser instaladas em desnível hidráulico muito reduzido; **Turbinas Bulbo**, que é uma evolução das turbinas Tubulares, e por dispensar a caixa em caracol e o trecho vertical do tubo de sucção ocupa menos espaço e, por absorver uma

descarga maior, apresenta maior potência a plena carga em relação as turbinas Kaplan, porém, a limitação do diâmetro do rotor e do bulbo para redução dos custos, obriga à construção de alternadores de pequeno diâmetro mas muito alongados axialmente, o que, por sua vez, acarreta problemas de resfriamento para o gerador e de custo para o eixo e mancais; **Turbinas Straflo**, que são do tipo axial e tem o escoamento retilíneo, em que as trajetórias das partículas líquidas são hélices cilíndricas, e tem como vantagem não haver a necessidade de colocar o gerador no interior de um bulbo, o que cria problemas de limitação das dimensões do gerador e de resfriamento, e assim como as turbinas de Bulbo e Tubulares, as turbinas Straflo podem ser instaladas com eixo horizontal ou inclinado.

“No projeto de uma turbina deve ser levado em conta sua potência e ponto de operação para que seja definida a curvatura das pás e seu dimensionamento, tornando seu rendimento o maior possível.” (BARBOSA, 2006).

6. CAVITAÇÃO

Segundo PEREZ (1995), cavitação é o fenômeno quando ocorre a evaporação do líquido sob uma pressão absoluta que diminui chegando a ser igual ou menor a pressão de saturação do líquido, assim começa-se o surgimento de pequenas bolhas de vapor, as quais aumentam conforme a pressão diminui e quando transladam para uma região de alta pressão entram em colapso, com a condensação do vapor e o retorno ao estado líquido.

As implosões ou explosões (o colapso) das bolhas de vapor fazem com que haja um deslocamento do líquido, que está próximo, para seu interior, gerando uma pressão de inércia considerável, a partir deste momento as bolhas, por causa da condensação, transformam-se em partículas. Segundo QUEIROZ (2012) estas partículas

“(…) se chocam muito rapidamente umas de encontro às outras, e de encontro à superfície que se antepõe ao seu deslocamento. Produz-se, em consequência, simultaneamente, uma alteração no campo representativo das velocidades e das pressões que deveria existir segundo as considerações teóricas do escoamento líquido”

“O crescimento e explosão das bolhas produzem ondas de alta pressão. Cada ciclo dura somente alguns milissegundos, mas a amplitude da pressão são relativamente grandes (em torno de 4000 atm) ” (PEREZ, 1995, p.33). Essas ondas fazem com que haja mudanças nas características do escoamento, o que o torna mais instável, causando oscilação, vibração e erosão no equipamento. A Figura 6 mostra imagens de uma bolha em colapso próxima a uma superfície sólida, para um rotor de aço inox sob o efeito da erosão por cavitação. O gráfico na parte superior representa uma curva da variação da pressão na superfície em diferentes estágios do processo de formação e colapso das bolhas de vapor.

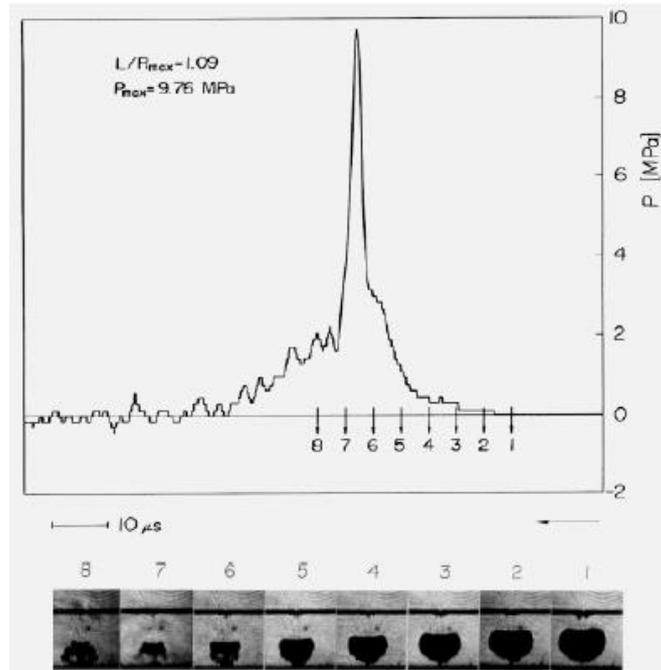


Figura 6 – Apresentação de colapso de uma bolha próxima de uma superfície sólida e o gráfico da pressão na bolha.
 FONTE: Observação do fenômeno da cavitação e do desgaste de rotores de latão de bombas centrífugas em instalação experimental (MIRANDA, 2007 apud LINHARES, 2011).

A Figura 7 apresenta um esquema onde é apresentado o colapso de uma bolha em três maneiras diferentes.

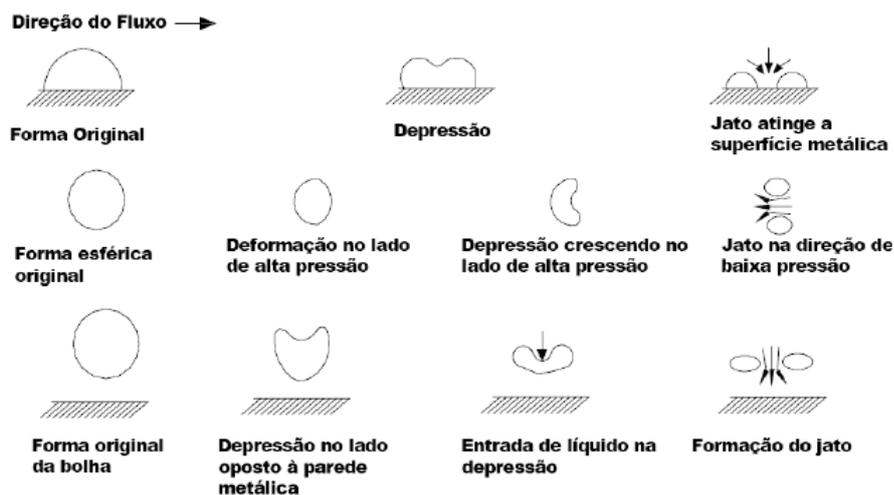


Figura 7 - Esquema do colapso de uma bolha próximo a uma superfície em três situações características.

FONTE: Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga (GREIN&WYSS, 1974 apud COELHO, 2006).

Além da pressão existem outros parâmetros que promovem o aparecimento da cavitação como a alteração de temperatura do fluido, a quantidade de gás dissolvido, a rugosidade do material exposto ao fluxo. Entre as metodologias de projeto para evitar esse processo de cavitação podemos citar a determinação do NPSH (*Net Positive Suction Head*) da instalação que é o parâmetro responsável por quantificar a energia (carga) medida em pressão absoluta disponível na entrada de sucção de uma hidráulica. O efeito deste fenômeno está presente em diversos tipos de materiais como metálicos, vidros, borrachas, e são comuns em bombas, válvulas, turbinas hidráulicas e outros equipamentos cujas instalações estão sujeitas a alteração no campo de pressão.

Para compreendermos a cavitação foram associados parâmetros adimensionais a ela. Estes ajudam a determinar o estado de cavitação em fluxos. Segundo PEREZ (1995) o número de cavitação, σ , é usado na verificação da ocorrência de cavitação em um determinado sistema. Quanto menor o número de cavitação, maior a chance de ocorrer este fenômeno.

$$\sigma = \frac{2(P_s - P_v)}{(\rho v^2)} \quad (1)$$

Onde:

σ – Número de cavitação;

P_s – Pressão estática;

P_v – Pressão de vaporização;

ρ – Densidade do fluido;

v – Velocidade do fluido na região não perturbada.

Outro parâmetro adimensional e fundamental na análise da cavitação é o coeficiente de Thoma. HORTA (2001) diz que Thoma é uma referência para os níveis de cavitação incipiente, desenvolvida e decorrente. Para turbinas hidráulicas este coeficiente assume a seguinte expressão:

$$\sigma_p = \frac{H_a - H_v - H_s}{H} \quad (2)$$

Onde:

H – Altura da coluna de líquido;

- H_a – Altura da coluna de líquido correspondente a pressão atmosférica;
 H_v – Altura da coluna de líquido correspondente a pressão de vapor;
 H_s – Altura da coluna de líquido correspondente a calagem da turbina hidráulica e;
 σ_p – Coeficiente de cavitação da instalação.

Para valores relativamente grandes de número de Thoma, tem-se uma estabilidade na potência, no rendimento e na vazão. Quando esse número diminui esses parâmetros variam, apresentando uma queda, e essa queda corresponde a ação da cavitação. De acordo com COELHO (2006), se o Número de Thoma diminui por conta da pressão estática ou pelo aumento da velocidade do escoamento, esse fenômeno apresenta maior probabilidade de ocorrência.

DE FALCO ([s.d.] apud SANTOS, 2013) cita que o coeficiente mínimo do número de Thoma para a Turbinas Francis é $4,68 \times 10^{-4} n^{1,41}$ e para Turbina Kaplan é $4,24 \times 10^{-4} n^{1,46}$, com n sendo a rotação específica.

Nas bombas centrífugas, este parâmetro pode ser obtido em função da rotação específica, que pode ser obtida pela equação apresentada a seguir (COELHO, 2006).

$$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (3)$$

Ou

$$n_q = \frac{30\omega\sqrt{Q}}{\pi H^{\frac{3}{4}}}, \quad \text{onde} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad n \text{ em rpm.} \quad (4)$$

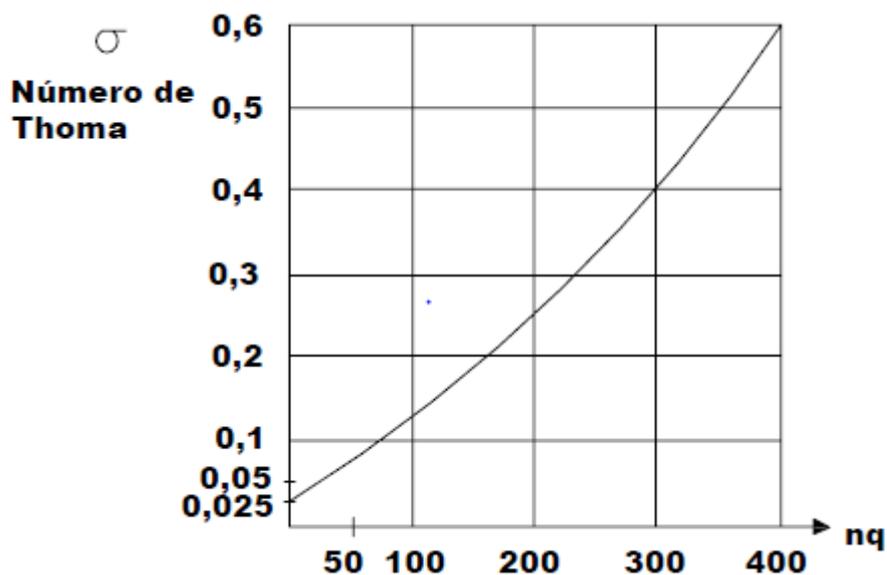


Figura 8 - Curva do fator de Thoma X Velocidade Específica.
FONTE: Análise do fenômeno de cavitação em bombas centrífugas
(MATTOS&FALCON, 1998 apud COELHO, 2006).

HENRY (1987 apud PEREZ, 1995), demonstra que mesmo que o número de Thoma esteja adequado ainda há o aparecimento da cavitação, concluindo que o aparecimento da cavitação depende apenas das condições de funcionamento.

A cavitação pode ocorrer de diversas maneiras e níveis, isso depende das condições de funcionamento das turbomáquinas, do tipo de fluxo do escoamento, do local onde ocorre entre outros fatores, como pode ser verificado na classificação a seguir.

6.1. NÍVEIS DE CAVITAÇÃO

A intensidade da cavitação pode ser dividida em quatro níveis diferentes, de acordo com BALL *et al* (1975, apud LINHARES, 2011, p.8) esses níveis e suas características são:

- **Cavitação incipiente:** está ligada ao início da cavitação, quando os seus efeitos podem ser notados, no entanto de uma forma fraca, seus ruídos são leves e incontínuos e a vibração causada pelo fenômeno nesse nível é fraco não prejudicando o funcionamento do equipamento.
- **Cavitação crítica:** neste nível a cavitação tem seus efeitos constantes, os ruídos são contínuos e comparados ao som de bacon fritando (“*frying bacon noise*”). A vibração é

razoável e os efeitos negativos na operação dos equipamentos somente são notados para longos períodos de exposição da máquina a esta situação.

- **Cavitação com perigo incipiente:** neste nível as implosões das cavidades começam a produzir ruídos relativamente altos, mas toleráveis, e as vibrações já começam a provocar pequenos danos físicos no equipamento. Em superfícies irregulares ou rugosas a classificação do nível de cavitação com perigo incipiente pode ser confundida com o nível crítico.
- **Cavitação plenamente estabelecida ou cavitação intensa:** nesta condição, a pressão média imediatamente a jusante da região em análise, alcança valores da pressão de vapor do líquido. O escoamento é acompanhado de um nível de ruídos e vibrações excessivo. Devido a cavitação ser um fenômeno físico e não ter como evitá-la, neste nível, as turbomáquinas operadas precisam estar sob um cuidadoso e elaborado procedimento de operação.

A Figura 9 destaca os sinais de emissão acústica (EA) durante a ocorrência da cavitação em quatro etapas: durante a cavitação incipiente, a cavitação intensa, as transições de abertura e fechamento parcial da válvula de descarga, evidenciando a cavitação em condições de cavitação incipiente e cavitação intensa, durante ensaio de 1800 segundos.

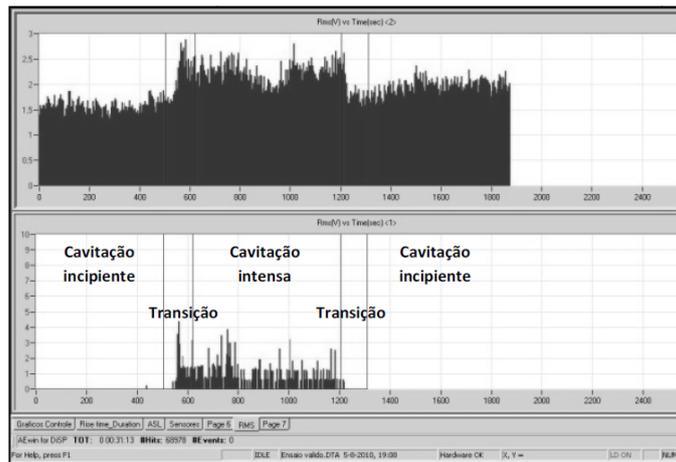


Figura 9 - Resultados dos sinais da energia total (parte superior) e contagem de emissão acústica (parte inferior da figura) X tempo.

FONTE: Observação do fenômeno da cavitação e do desgaste de rotores de latão de bombas centrífugas em instalação experimental (LINHARES A. D, 2011).

6.2. TIPOS DE CAVITAÇÃO

KNAPP (1970 apud PEREZ, 1995, p.35) considera como principal forma de classificar a cavitação as condições e as principais características físicas do escoamento, considerando essas condições classificou esse fenômeno da seguinte forma:

- **Cavitação em movimento:** Na cavitação em movimento verifica-se as três fases da cavitação: o início, o desenvolvimento e o colapso. Neste tipo de cavitação as bolhas estão em movimento junto ao fluxo.
- **Cavitação fixa:** Ocorre quando um corpo rígido é submerso numa corrente de fluxo. Este corpo forma uma cavidade e em forma deste as bolhas se movimentam no mesmo sentido do fluxo, sendo estas maiores à montante e, adiante desaparecem na jusante do corpo rígido que está submerso. Se as condições de fluxo forem estáveis a cavidade formada também será.
- **Cavitação em vórtice:** Este tipo tem similaridades com o caso anterior, aqui a cavitação pode aparecer como cavitação em movimento ou fixa, mas há adicionalmente um gradiente e pressão que é paralela à superfície e normal ao fluxo. O fluxo provocado por este gradiente forma redemoinhos nas extremidades dos corpos submersos. Este tipo de

cavitação ocorre em zonas de transferência. É um dos tipos mais antigos já estudados, sendo muito mais erosivo.

- **Cavitação vibratória:** Neste tipo de cavitação um elemento de um líquido sofre vários ciclos de cavitação devido a mudanças de pressão de alta amplitude e de alta frequência, e mesmo que haja fluxo contínuo pode-se ter um campo de velocidade que faça com que um elemento de líquido seja exposto à cavitação. As variações de pressão são causadas pelas superfícies submersas que vibram perpendicularmente à sua superfície e geram ondas de pressão de fluido.

As cavitações em movimento e fixa ocorrem quando o fluxo é impedido de seguir numa certa direção, sendo assim, desviadas, causando turbulência.

HENRY (1989 apud PEREZ, 1995, p.39) fez um estudo sobre os principais casos de cavitação que ocorrem em turbinas hidráulicas, comprovando, como foi citado anteriormente, que a cavitação pode ocorrer mesmo que o número de Thoma esteja adequado. Desta forma fez-se uma classificação em função do Número de Thoma. A classificação apresenta-se da seguinte forma:

- **Cavitação que depende do número de Thoma:** Este tipo de cavitação aparece quando a turbina trabalha em condições de fluxo com um número de cavitação menor que o Número de Thoma.
- **Cavitação que não depende do número de Thoma:** Mesmo que apresente um número menor que o Número de Thoma, pode-se ter vários tipos de cavitação.
- **A cavitação de entrada do lado de pressão da pá:** Ocorre em sobrecargas com quedas maiores que a queda nominal e em uma ampla faixa de vazão. É um tipo de cavitação de difícil detecção, pois aparece em área de máxima eficiência, causando fortes erosões em pouco tempo.
- **A cavitação de entrada do lado de sucção da pá:** Apresenta-se em cargas parciais com baixa queda. Este tipo de cavitação apresenta um grau de corrosão menor que a anterior porque existe um afastamento das bolhas das paredes das pás.
- **A cavitação de vórtice:** ocorre entre as pás das turbinas quando esta trabalha em cargas parciais. Este fenômeno acontece devido a alterações no fluxo, como redemoinho que podem ser causados por interferências no fluxo. A grande velocidade associada à aderência do fluido com as pás provoca vórtices que colaboram para geração de regiões

de baixa pressão, que posteriormente podem se tornar regiões de cavitação. Como apresentado na figura seguinte.

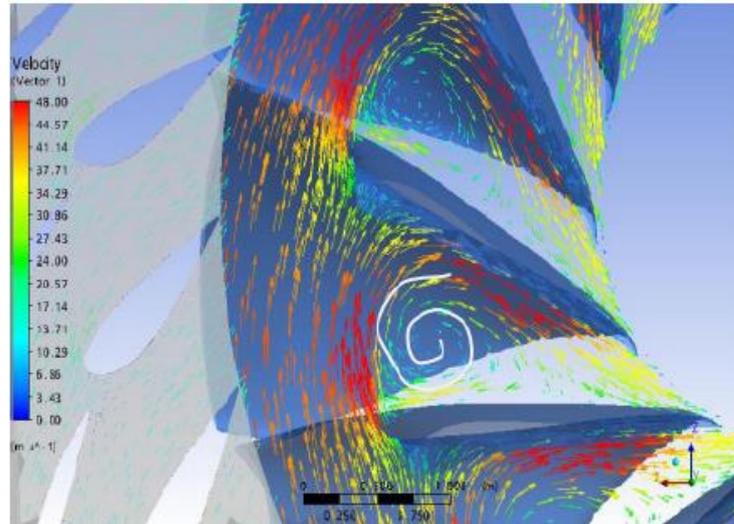


Figura 10 - Representação de fluxo do fluido nas pás de uma turbina Francis com vetor de velocidade atuante.

FONTE: Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan (LIMA, 2011 apud SANTOS, 2013).

Existem ainda vários outros tipos de cavitação além dos já citados, como a cavitação induzida pela turbulência de Von Karman, que se forma na borda de saída da pá. Esta pode aparecer devido ao ângulo de ataque e formas das pás. Nas turbinas, sua formação depende das condições de carga e com valores abaixo do Número de Thoma.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (1987 apud PEREZ, 1995, p. 41) classificou a cavitação para as turbinas Kaplan e Francis em função do lugar onde aparece da seguinte forma:

- **Cavitação de ponta de folga:** Aparece nos extremos das pás e nas paredes de carcaça da turbina. É do tipo contínuo, gera som do tipo intermitente (que não é contínuo, se interrompe) e tem explosões aleatórias. As pás mais grossas apresentam maior redução de pressão, ou seja, maior coeficiente de sustentação que as pás mais delgadas. As turbinas hidráulicas têm as pás mais delgadas, por essa razão esse tipo de cavitação não é muito presente nelas.
- **Cavitação de espaço:** Localiza-se entre a raiz das pás e o cubo da turbina Kaplan.
- **Cavitação nas superfícies das pás da turbina:** Este tipo de cavitação ainda pode ser classificada em: leading-eag sheet cavitation, que se forma a partir do bordo de ataque das

pás de turbinas, se caracteriza por ser não- uniforme e por isso é instável (no tempo) em relação as pás do rotor. E cavitação de espessura, que ocorre nas superfícies das pás, e está associada a espessura destas. A Figura 11 mostra como forma a cavitação se forma no bordo das pás das turbinas, e os danos e ela pode causar nessas estruturas.

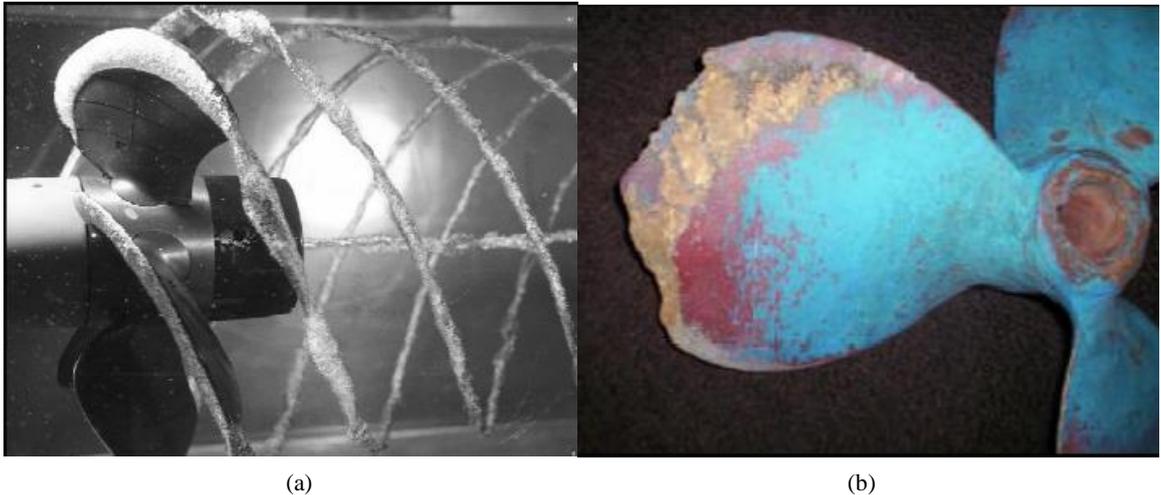


Figura 11 - (a) Formação da cavitação e (b) Erosão devido à cavitação do bordo de ataque de pá.
FONTE: Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan (ESCALER, 2004 apud SANTOS, 2013) e (b) (RIBAS, [s.d.] apud SANTOS, 2013).

- **Cavitação de vórtice no cubo:** Este tipo de cavitação tem a forma de uma chaminé de vapor, e provoca altos níveis de vibração e som ao atravessar o tubo de sucção da turbina. Nas turbinas Kaplan pode-se formar na saída do cubo, e nas turbinas Francis são conhecidos como cavitação de vórtice de núcleo. Nesta forma-se um vórtice de núcleo na saída da turbina, se a pressão no núcleo do vórtice for menor ou igual que a pressão de vaporização, este núcleo produzirá cavitação e a intensidade dessa cavitação é proporcional a magnitude do Número de cavitação e da intensidade do vórtice formado (proporcional à diferença da carga relativa à carga nominal). Esse tipo de cavitação se apresentando mais frequente nas turbinas Francis que em turbinas Kaplan, pois esta última tem as pás ajustáveis para cada tipo de carga. Na Figura 12 é apresentado a cavitação em vórtice de núcleo.



Figura 12 - Cavitação em vórtice numa turbina Francis.
FONTE: Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan (SANTOS, R. C. L. dos., 2013).

6.3. IMPACTOS DECORRENTES DA CAVITAÇÃO

A cavitação é um problema que afeta diretamente todos os tipos de máquinas hidráulicas que realizam o transporte de algum tipo de fluido: Bombas, turbinas, injetores sofrem com os danos causados pela cavitação, desde o desgaste erosivo até a perda de rendimento. Conforme TERRES (2006), a cavitação pode causar danos tanto estruturais quanto energéticos, com o colapso das bolhas de vapor, surgem efeitos indesejáveis no escoamento do fluido tornando-o instável, aumentando a resistência total e isso está diretamente ligado a redução do rendimento das turbinas e bomba hidráulicas. Além deste impacto outro efeito deste fenômeno está ligado à manutenção e trocas de equipamentos ou peças, pois a cavitação age erodindo o equipamento e isso causa a retirada do material protetor da superfície, a erosão provoca, além de uma perda significativa de rendimento da máquina hidráulica, o desbalanceamento de peças e esses efeitos causam danos irreversíveis e paradas de manutenção frequentes.

A erosão cavitacional contribui para que os níveis de cavitação sejam maiores, devido ao aumento na rugosidade da superfície que está em contato com o fluido. Segundo PEREZ (1995), este efeito negativo depende muito das cavitações locais e, numa escala de potencial

erosivo, a que mais se destaca em provocar este dano é a cavitação de espessura. DANDRÉ FILHO (2002) menciona que em muitos casos, o dano causado por este fenômeno é tão grande que, além de reduzir a vida útil de obras e equipamentos, obriga a largos períodos de interrupção de funcionamento destes. “Quando aparece o dano na estrutura provocada pela cavitação, a área danificada resulta ser maior que a própria irregularidade que a causou, transformando-se em uma nova fonte de cavitação, continuando o processo e produzindo danos de maior tamanho”. A seguir a Figura 13 e a 14 apresentam partes de turbomáquinas danificadas por erosão devido a cavitação. A primeira apresenta uma pá de turbina Francis e a segunda o rotor de uma bomba centrífuga.

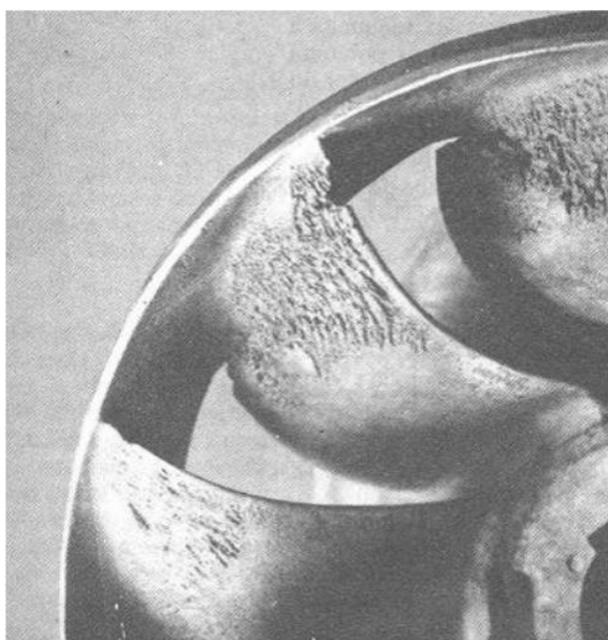


Figura 13 - Pás com erosão devido à cavitação.
FONTE: Avaliação de cavitação em Turbinas Hidráulicas por Emissão Acústica (QUEIROZ F. R., 2012).

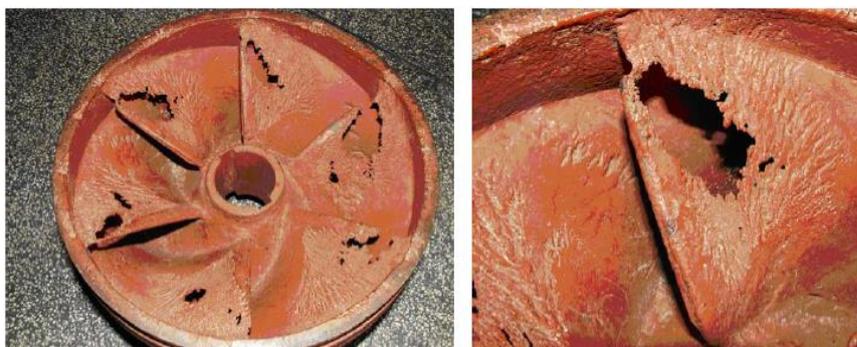


Figura 14 - Rotor de bomba centrífuga danificado por erosão causado por cavitação.
FONTE: Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga (COELHO, W. R., 2006).

Em uma de suas pesquisas, TERRES (2006) associa a cavitação ao aumento de ruídos e vibrações durante o funcionamento das turbomáquinas, a vibração pode implicar em grandes amplitudes de oscilações causando rupturas de partes das instalações que podem se romper, causar fadiga dos materiais, levando o equipamento à uma falha prematura.

Os elevados níveis de ruídos produzidos caracteristicamente pela cavitação em uma ampla escala de frequências e as acentuadas vibrações decorrentes produzem rupturas das tubulações e junções devido, principalmente, a fadiga dos materiais. As vibrações produzidas podem implicar em grandes amplitudes de oscilação e, em alguns casos, partes das instalações se soltam de suas bases e fixações, produzindo efeitos danosos e, praticamente impedindo sua operação.

A contabilização dos prejuízos não deve ficar apenas na soma da mão de obra e dos materiais de reposição despendidos, mas também deve-se acrescentar as perdas decorrentes de manter uma máquina, ou instalação completa fora de atividade, para sua produção e, promovendo prejuízos financeiros.

7. CAVITAÇÃO EM TURBOMÁQUINAS

Durante o funcionamento desse tipo de máquina, podem surgir fenômenos relacionados a esse funcionamento e a própria estrutura do equipamento. A cavitação é um destes fenômenos, que como consequência pode provocar erosão na estrutura do equipamento, vibrações e ruídos excessivos, diminuição do rendimento das turbinas hidráulicas e das bombas centrífugas, sendo assim um fator indesejável ao processo. Deste modo é necessário que se tome devidos cuidados, tanto nas turbinas hidráulicas quanto nas bombas centrífugas, para que o aparecimento deste fenômeno seja retardado e, se necessário, controlado. (SIMÃO, 2009). A seguir serão mostrados os efeitos e características da cavitação em dois tipos de Turbomáquinas: bombas centrífugas e turbinas hidráulicas.

7.1. CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS

A cavitação é um fenômeno que decorre da vaporização do fluido no interior da bomba quando o mesmo atinge uma pressão inferior à pressão de vapor. Conforme GONÇALVES (2014), é muito comum haver cavitação próxima ao impelidor, devido a rarefações do líquido devido à própria natureza de escoamento do fluido ou ao movimento de impulsão.

“Este fenômeno é extremamente prejudicial ao funcionamento da bomba, pois as bolhas que se formam são arrastadas pelo movimento do fluido e, devido ao próprio funcionamento da bomba, quando as pressões são novamente elevadas acima da pressão de vapor do fluido estas bolhas se colapsam e geram ondas de choque que podem danificar as pás do impelidor ou outras partes da bomba. O colapso destas bolhas pode causar além de danos a integridade estrutural da bomba, barulho e vibração excessivos e queda no desempenho”.

A Figura 15 apresenta curvas em condições normais e com a presença de cavitação, estas estão relacionadas a eficiência de operação da bomba (η) com a vazão (Q) a qual ela opera.

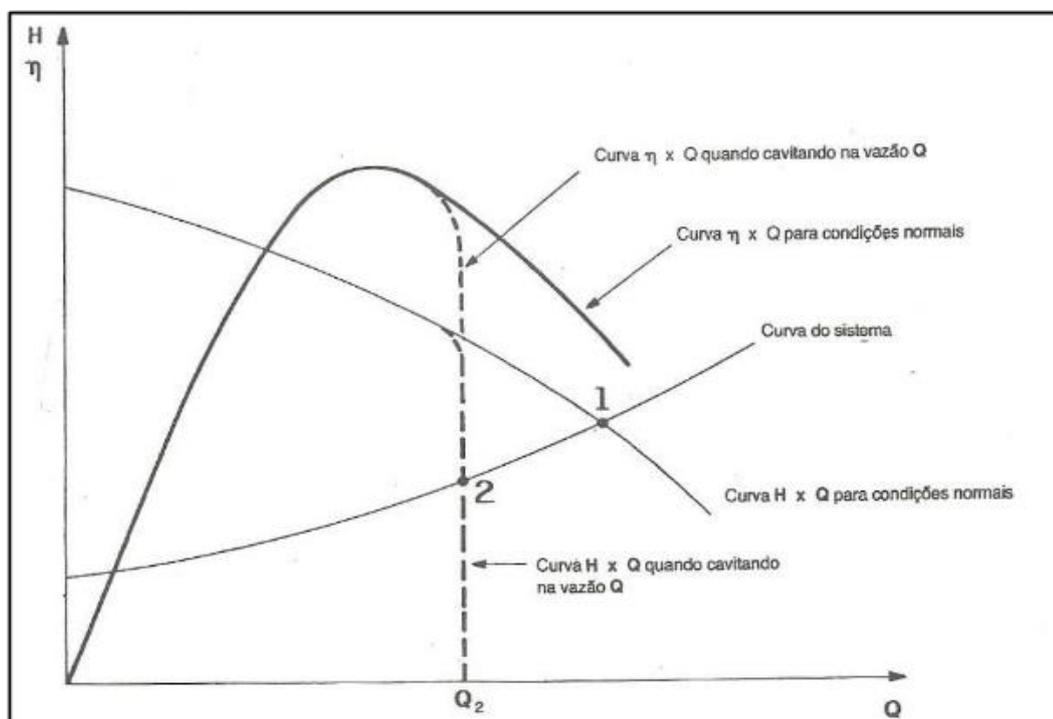


Figura 15 – Influência da cavitação nas curvas da bomba.

FONTE: Redimensionamento de uma Bomba Centrífuga para o Sistema de Combate a Incêndio de uma Planta Industrial (GONÇALVES, M.D., 2014).

Conforme PARKER TRAINING (2008), para que uma bomba centrífuga tenha um desempenho satisfatório, sem apresentar nenhum problema, deve ser instalada corretamente, ser operada com os devidos cuidados e ter manutenção adequada. Estes cuidados devem ser preliminares, diante de que, se a pressão na entrada da bomba p_{abs} for menor que a pressão atmosférica p_{atm} o fluido que ali se encontra tem uma temperatura de vaporização menor, e, se esta pressão for menor que a pressão de vaporização, $p_{abs} \leq p_{vapor}$, ocorrerá a cavitação na entrada da bomba.

Deve-se ter a mesma preocupação enquanto a saída da bomba já que sempre se tem a pressão maior que a pressão atmosférica e isto implica na condensação do vapor o que causa: um aumento da energia dissipada, uma diminuição do rendimento da bomba, ruídos indesejáveis, diminuição do tempo vida da bomba, etc. Conforme essas cavidades são expostas à alta pressão na saída da bomba, as paredes das cavidades se rompem e geram toneladas de força por centímetro quadrado. O desprendimento da energia gerada pelo colapso das cavidades

desgasta as superfícies do metal. Se a cavitação continuar, a vida da bomba será bastante reduzida e os cavacos desta migrarão para as outras áreas do sistema, prejudicando os outros componentes.

No caso da cavitação na entrada da bomba, para evitá-la, a pressão neste local deve estar na escala absoluta p_{abs} maior que a pressão de vapor p_{vapor} , porém é importante saber que esta condição não é suficiente para garantir que não ocorra o fenômeno de cavitação em uma bomba hidráulica.

Outras medidas a serem tomadas são:

- ✓ Dimensionar o diâmetro de recalque (após a bomba) e adotar para a tubulação antes da bomba um diâmetro comercial imediatamente superior;
- ✓ O comprimento da tubulação antes da bomba deve ser o menor possível;
- ✓ Na tubulação antes da bomba utiliza-se as singularidades estritamente necessárias o que garantirá que a somatória dos comprimentos equivalentes seja a menor possível;
- ✓ Trabalhar com a cota da entrada menor possível, inclusive procurando trabalhar com a bomba afogada, que além de originar uma cota negativa, acaba evitando o uso da válvula de pé com crivo, ou válvula de poço, que é responsável por grande parte da perda antes da bomba.

Outra condição necessária e suficiente para que o fenômeno da cavitação não ocorra é que:

$$NPSH_{disponível} > NPSH_{requerido}$$

Conforme LEITE (2012), o NPSH é um importante conceito que permite avaliar as condições de aspiração de uma bomba centrífuga e fazer uma previsão da margem de segurança contra os efeitos da cavitação, durante o funcionamento da bomba.

O $NPSH_{requerido}$ é fornecido pelo fabricante de bomba e o $NPSH_{disponível}$ é o calculado pelo projetista da instalação de bombeamento. Esses dados servem para monitorar a operação de uma determinada bomba em um sistema.

7.1.1- $NPSH_{requerido}$

Uma bomba centrífuga só irá trabalhar satisfatoriamente se não existir formação de vapor no seu interior. Para tal, a pressão do fluido deverá ser sempre superior a sua pressão de

vaporização. Então, o $NPSH_{requerido}$ é o valor mínimo requerido pela bomba para que não ocorra cavitação.

7.1.2- $NPSH_{disponível}$

Corresponde ao valor de NPSH disponível na instalação, na zona da aspiração da bomba. Esse valor deverá ser sempre superior ao $NPSH_{requerido}$, para assegurar a não ocorrência do processo de cavitação na bomba. Podendo ser calculado de duas formas: fase de projeto e fase de operação.

7.2. CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS

De acordo com HORTA *et al.* (2001, p. 2), a cavitação é uma grande preocupação para o setor elétrico quando se trata de usinas hidrelétricas. Este fenômeno pode ocorrer em qualquer estrutura hidráulica de uma usina, tais como: vertedouro, válvulas, canais, túneis, comportas e principalmente nas turbinas hidráulicas, produzindo efeitos indesejáveis e agressivos, vibrações e ruídos excessivos, diminuição da capacidade dos vertedouros de usinas hidrelétricas, redução da eficiência de turbinas hidráulicas e erosão de contornos sólidos, este sendo um dos fatores mais preocupantes, resultando em perdas na geração de energia devido a indisponibilidade temporária dos equipamentos danificados.

As turbinas que mais estão expostas ao aparecimento desse fenômeno são a Francis e a Kaplan, devido a depressões ocorridas com maior frequência nas regiões convexas próximas à saída das pás rotoras. Devido às diferenças entre esses equipamentos e as variações de locais do aparecimento e da ação desse fenômeno nestes equipamentos, mostrou-se importante haver uma classificação da cavitação em função desses tipos de turbinas. HORTA (2001), apresenta esta classificação como:

- **Cavitação fixada** (MICHEL & BELAHADJI, 1997 apud HORTA, 2001), que consiste basicamente da formação, crescimento e enchimento de uma cavidade de vapor; - Cavitação por vórtice, que se desenvolve normalmente em regiões de alta tensões cisalhantes, onde ocorre a formação de vórtices;

- **Cavitação por bolhas** (FRANC *et al*, 1995 apud HORTA, 2001) em menor escala, ocorre como consequência do ciclo da bolha, originado devido a gradientes de pressão e a existência de germes ou núcleos contidos nos fluidos. A figura a seguir apresenta esse tipo de cavitação.

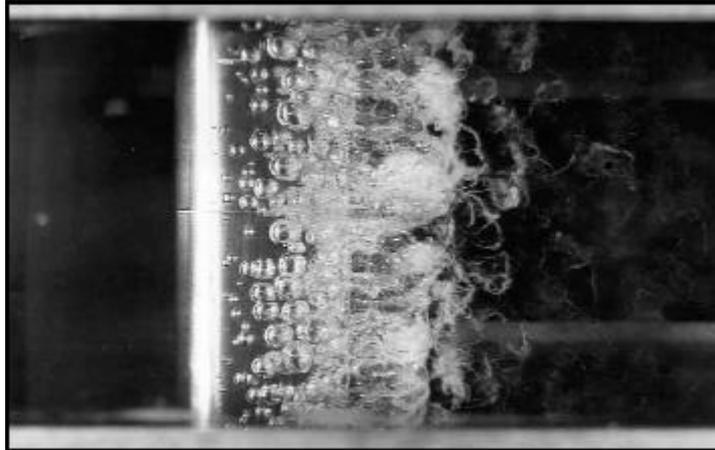


Figura 16 - Cavitação em bolhas.

FONTE: Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan (ESCALER, 2004 apud SANTOS, 2013).

Nota-se nas figuras seguintes os danos causados por este fenômeno.

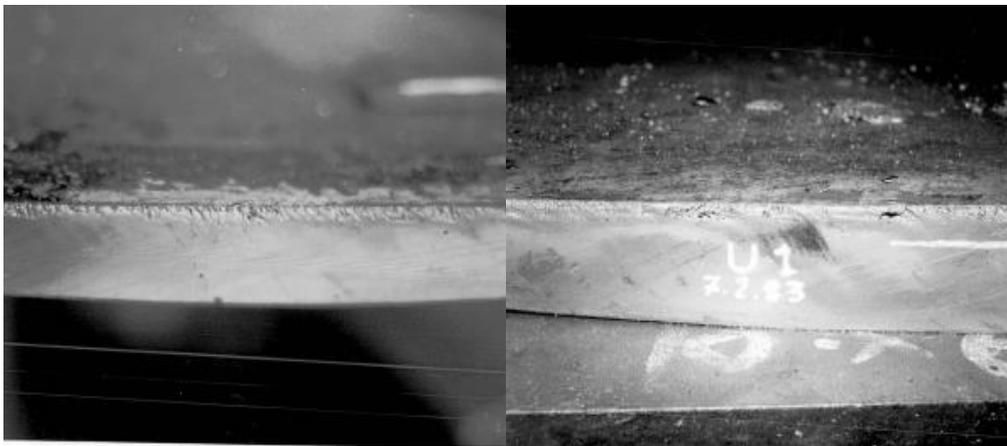


Figura 17 - Efeito da cavitação em pás de rotor.

FONTE: Levantamento fotográfico (ELETROBRÁS – ELETRONORTE, [s.d])

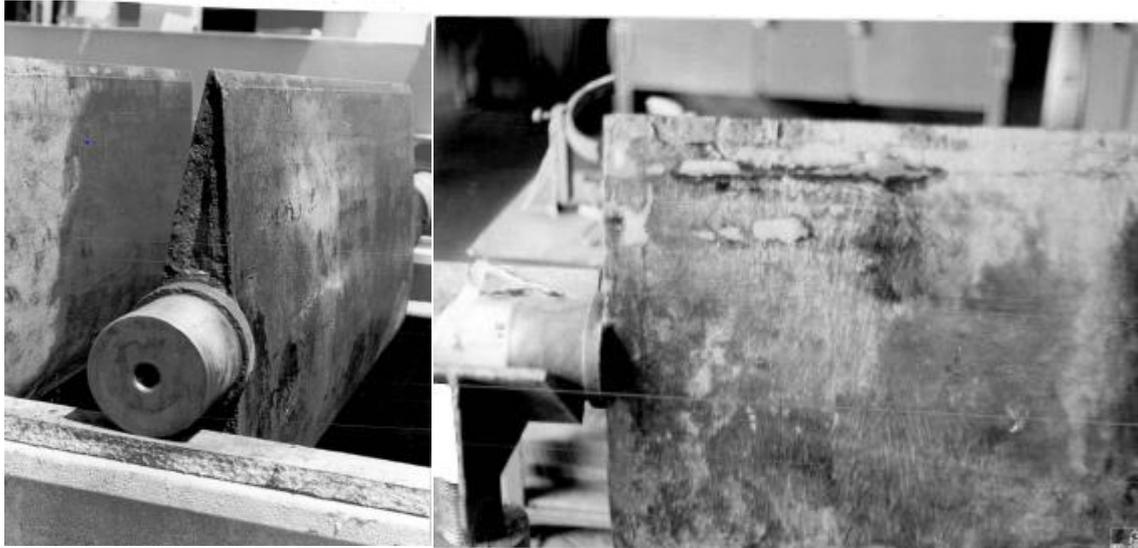


Figura 18 - Corrosão na palheta da turbina e eixo inferior.

FONTE: Levantamento fotográfico (ELETROBRÁS – ELETRONORTE, [s.d])

A detecção da cavitação em bombas e turbinas ocorre principalmente através do ruído, vibração no sistema e perda de rendimento hidráulico, todos associados ao fenômeno. Para isto é necessário à aplicação de técnicas de análise e monitoramento. Neste trabalho foram descritos dois tipos: a Técnica de Emissão Acústica e a de Vibração.

8. MÉTODOS DE ANÁLISE E MONITORAMENTO DA CAVITAÇÃO

8.1. TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA NA ANÁLISE E MONITORAMENTO DE CAVITAÇÃO

As bolhas de vapor causadas pela cavitação são fontes que transmitem som em forma de onda, as quais se propagam pelo fluido e estas quando entram em contato com a estrutura transferem parte da energia acústica de alta frequência causando vibração da mesma. “Assim, o som associado à cavitação pode ser medido na estrutura ou no fluido. Nos métodos acústicos basicamente se mede a pressão acústica e posteriormente se pode determinar a intensidade, potência acústica” (PEREZ, 1995, p.47). Os níveis e variações de cavitação é um fator que influencia nos parâmetros relacionados à energia de vibração e de acústica.

QUEIROZ (2012) destaca que a técnica de emissão acústica é eficaz tanto para detectar os níveis e tipos de cavitação quanto para correlacionar os sinais obtidos com a erosão causada pela cavitação. E assim, as equipes de manutenção podem planejar o momento ideal para os serviços de reparo nas partes danificadas das turbomáquinas, reduzindo o tempo em que esses equipamentos ficarão inoperante.

A técnica de emissão acústica é considerada uma metodologia barata e rápida no que tange a detecção de problemas estruturais até mesmo envolvendo a cavitação, uma das vantagens deste método está ligado a não introdução de outras interferências na estrutura como feixes de radiação eletromagnética ou pulsos de onda, outra vantagem é que a análise é realizada em tempo real, sem a necessidade de parar a máquina, e o monitoramento pode ser contínuo ou intermitente além disso, pode-se envolver toda a estrutura ou só uma parte dela. Para compreender melhor essa técnica apresentamos alguns conceitos importantes sobre o assunto.

8.1.1- Fundamentos De Acústica

Ondas sonoras são ondas longitudinais e propagam-se através de qualquer meio material com velocidade que depende das propriedades físicas deste meio. Dependendo da sua frequência podem ser divididas em três categorias:

- I. Ondas audíveis são as que têm frequência entre 20 e 20000 Hz, estas o ouvido humano consegue perceber e interpreta como som.
- II. Ondas de infra-som essas estão abaixo da frequência audível (< 20 Hz).
- III. Ondas de ultra-som possuem frequências que superam o limite da faixa audível (>20000 Hz).

O som pode propagar-se e ser medido em vários meios, nas turbomáquinas os fenômenos hidráulicos associados ao fluxo como turbulência e a cavitação provocam ondas de pressão que se propagam na água e atingem a estrutura do equipamento transmitindo energia acústica para a mesma. QUEIROZ (2012) afirma que, estas “ondas de pressão que atingem a estrutura são transmitidas para este meio onde continuam se propagando. O movimento vibratório da estrutura provoca oscilações do ar ao redor desta irradiando som no ar”. A partir desta transmissão de energia para o equipamento pode-se medir o som no fluido ou na estrutura.

“O som e a vibração da estrutura devido à cavitação tem as seguintes características:

- O som devido à cavitação tem dois tipos de componentes principais, as implosões e as flutuações das cavidades. As oscilações das cavidades são devido às turbulências e ao fluxo instável e ocorrem numa faixa de frequências menores que 10 KHz. As implosões ocasionam som com frequências de 10 KHz até 1 MHz.
- As medidas de intensidade de vibração e do nível de som aumentam com o número de explosões das bolhas e a pressão de implosões respectivamente. ”

Os equipamentos hidráulicos são projetados para operarem em uma faixa de operação pré-determinada pelos fabricantes, quando seu regime está fora deste limite pode-se verificar o som através de instrumentação adequada e utilizar a emissão acústica para avaliar a integridade física de materiais além da detecção e monitoramento da cavitação.

8.1.2- Emissão Acústica

A emissão acústica (EA) “é o termo utilizado para definir o fenômeno de propagação de ondas mecânicas em determinado meio” (QUEIROZ, 2012, p. 32). A partir deste fenômeno

desenvolveu-se uma técnica de ensaio não destrutivo, não invasiva, de grande utilidade na detecção de defeitos ativos internos em materiais e equipamentos. O ensaio por emissão acústica baseia-se na detecção de ondas de origem mecânica, emitidas pelas discontinuidades durante a solicitação dos equipamentos. Sabe-se que em ensaios convencionais é necessário aplicar um determinado impulso sobre o equipamento e a partir disso analisar a resposta obtida. Com a emissão acústica nem todas as discontinuidades serão detectadas, pois somente os defeitos críticos entram em processo de fratura, à medida que a peça for solicitada mecanicamente. Neste caso, as atenções são concentradas na análise de defeitos ativos, isto é, que se alteram com a solicitação mecânica.

A técnica utilizando o fenômeno físico emissão acústica apresenta vantagens em relação às demais técnicas existentes para detectar variações no fluxo do fluido, e avaliar a integridade do equipamento, dentre outras destacam-se:

“(…) facilidade de aplicação; baixo custo; possibilidade de realização dos ensaios com o equipamento em operação, eliminando a necessidade de interrupções do seu funcionamento; detecção e análise de defeitos em tempo real; relativa imunidade a ruídos eletromagnéticos; possibilidade de localização tridimensional de defeitos.” (ELETROBRAS-CEPEL, [s.d.])

A Figura 19 apresenta o princípio desta técnica na avaliação de defeitos internos no material.

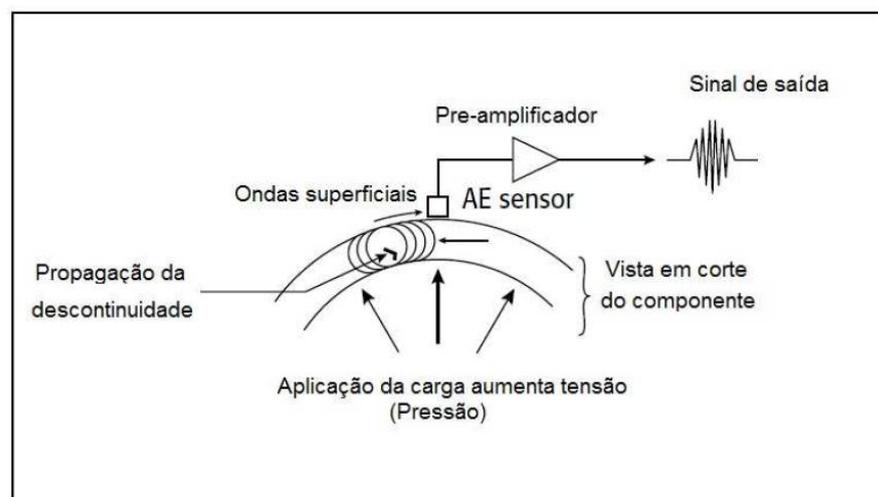


Figura 19 – Princípio da Técnica de Emissão Acústica.
FONTE: Avaliação em Turbinas Hidráulicas por Emissão Acústica
(QUEIROZ, 2012).

Conforme LINHARES (2011), quando os equipamentos são submetidos a um estímulo externo (alteração na pressão, carga ou temperatura) liberam energia, na forma de ondas de

tensão e produzem ondas de emissão acústica, as quais são respostas na ordem de picômetro. Após a configuração e montagem do equipamento de análise, o sensor é montado na superfície de ensaio e mantido em posição com fita adesiva ou cola. O operador monitora os sinais emitidos com as tensões induzidas no objeto. Essas ondas através de sensores instalados em pontos estratégicos do equipamento são detectadas e convertidas em um sinal elétrico. Estes processados por uma instrumentação específica que é capaz de indicar as fontes de emissão acústica e suas respectivas localizações.

Segundo ESCALER *et al.* (2006 apud QUEIROZ, 2012) “o princípio de detecção da cavitação utilizando a técnica de emissão acústica baseia-se na propagação das ondas geradas pelas implosões das bolhas de cavitação através do fluido e transmitidas pela estrutura chegando aos sensores de emissão acústica”.

8.1.3- Principais Parâmetros Da Técnica Da Emissão Acústica

As características de um sinal de emissão acústica envolvem parâmetros que serão mostrados na Figura 20, a qual mostra sinais típicos obtidos por EA e serão descritos a seguir.

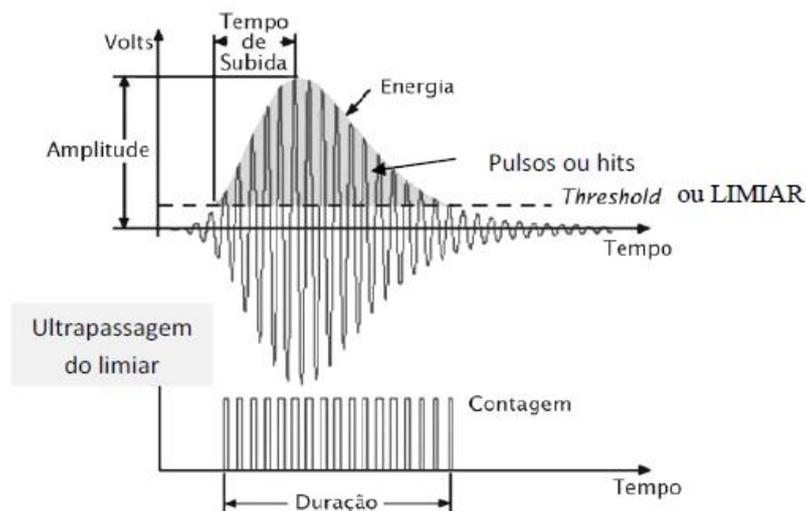


Figura 20 - Curva típica de Sinais de emissão acústica obtida nos ensaios.
 FONTE: Observação do fenômeno da cavitação e do desgaste de rotores de latão de bombas centrífugas em instalação experimental (LINHARES A. D., 2011).

Podemos destacar seis parâmetros importantes na EA, são eles: Amplitude, Contagem, Duração, Limiar de detecção, Hit e Tempo de subida.

Hit: é o processo de detecção e medição de um sinal de emissão acústica em um canal. O hit é iniciado quando o limiar de detecção é ultrapassado.

Amplitude (A): é a maior tensão medida em uma onda, ela que determina a detecção do sinal e sinais inferiores ao limiar não são considerados. A amplitude de emissão acústica está relacionada à intensidade da fonte do evento é comumente expressa em decibéis (dB).

$$A[dB] = 20 \log \left(\frac{V_{max}}{1\mu volt} \right) - (Ganho \text{ do pré - amplificador}) \quad (5)$$

onde: A é a amplitude em decibéis; V_{max} é a voltagem máxima recebida para aquela onda; Ganho do pré-amplificador é o ganho informado ao aparelho.

Tempo de subida: é o intervalo de tempo entre o primeiro limiar de passagem e o pico de sinal. Este parâmetro é governado por processos de propagação da onda e serve como um critério de filtro para o ruído.

Duração: é a diferença de tempo entre os cruzamentos de limiar e as medidas. Esse parâmetro depende da magnitude do sinal e da acústica do material analisado, é medido em microssegundos.

Contagem: é a quantidade de vezes que o sinal de emissão acústica cruzou o limiar de referência dentro de um hit. Esse depende da magnitude da fonte do evento, mas também depende das propriedades acústicas e natureza reverberante da amostra e do senso.

Limiar de detecção: é o limite de detecção de sinais que o sistema irá coletar, esse parâmetro define o que é ruído e quais são os sinais acústicos de interesse.

RMS: Raiz da integral dos valores de tensão ao quadrado dividida pelo intervalo de tempo dado pela diferença de tempo entre os limites superior e inferior de integração. A avaliação deste parâmetro pode ser feita de forma analógica e digital.

A forma digital se dá pela seguinte relação

$$RMS(s) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i)^2} \quad (6)$$

onde: s_i é o sinal obtido em volts (V) e o n é o número de sinais coletados dentro do intervalo de tempo estabelecido.

8.1.4- Detecção e Equipamentos Necessários

A detecção e aquisição do sinal de emissão acústica envolve uma série de componentes e procedimentos. Sabe-se que os sinais acústicos emitidos pela cavitação estão no domínio de alta frequência, assim os instrumentos utilizados devem ser capazes de atingir estes domínios. Basicamente a técnica de EA se dá com a instalação de sensores usando acopladores entre o sensor e o equipamento que vai ser monitorado, os sensores, por sua vez, são ligados a pré-amplificadores e estes são conectados a um sistema conversor analógico. É definido um limiar o qual define quais os sinais acústicos que serão analisados, e esses sinais com amplitude maior que o limiar serão adquiridos e armazenados na forma de banco de dados. Os principais equipamentos serão descritos a seguir:

Acoplante: este é o agente responsável pelo acoplamento do sensor com o equipamento a ser monitorado. Conforme JACQUES (2009), “o uso de um acoplante produz uma melhora na transmissão das ondas acústicas da ordem de 2 vezes para 100 kHz e mais de 10 vezes para 500kHz”. Tipicamente são usadas graxas feitas de silicone, óleo e cola. É importante ressaltar que a camada de acoplante deve ser a mais fina possível, não pode reagir com o equipamento (causar corrosão), ser apropriado para a temperatura que será exposto impedindo assim que haja trincamentos no sensor e assim gerar um falso sinal de emissão acústica

Sensores para emissão acústica: os sensores devem ser de fácil instalação e de detecção sensível. Conforme estudo de PEREZ (1995) há duas faixas de frequências que podem ser utilizadas para a medição do som sobre a estrutura “as vibrações numa faixa de frequências de (10-20) KHz e a emissão acústica numa faixa de frequências de 100KHz até 1MHz. Os transdutores utilizados devem cobrir estas faixas de frequências”. Dependendo se a aquisição e análise dos dados for analógica ou digital os equipamentos são diferentes.

“Se é analógico precisa-se de um circuito analógico que permita a avaliação do RMS. Se os processos são feitos em forma digital necessita-se de um computador equipado com um conversor analógico digital que permita adquirir os sinais em faixas adequadas de amostragem para os diferentes transdutores que sejam utilizados” (PEREZ, 1995, p. 51).

Pré-amplificadores e filtros de frequência: os pré-amplificadores são utilizados para amplificar o sinal que segundo JACQUES (2009) promovem “um ganho de típico de 100x (40dB) deixando assim o sinal mais suscetível a ruídos”.

Os sinais obtidos são filtrados devido a existência de outras excitações nas turbomáquinas como as mecânicas e hidráulicas e a partir de filtros passa-alta ou passa-faixa isola-se apenas o som devido à cavitação. Em turbinas “quanto mais erodidas as pás das turbinas, maiores serão os níveis de cavitação devido às alterações no fluxo. Daí pode-se estimar uma correlação dos sinais de emissão acústica com a erosão das pás” (QUEIROZ, 2012, p. 37).

Em um dos estudos encontrados na literatura sobre a técnica de emissão acústica para a detecção e monitoramento da cavitação, destaca-se o trabalho de HUIXUAN *et al.* (2007) que utilizaram a técnica para monitorar em tempo real uma turbina Kaplan da Usina de Gezhouba com o objetivo de analisar os sinais de emissão acústica nas pás e comparar os sinais antes e depois do reparo das pás devido a erosão causada pela cavitação. A Figura 21 apresenta os sinais coletados.

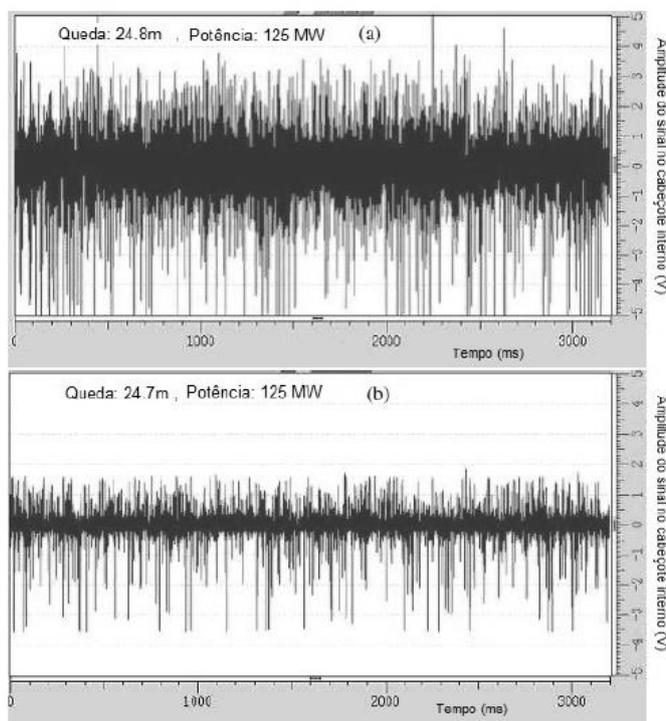


Figura 21- Sinais de emissão acústica coletados na turbina 21F da usina de Gezhouba (a) antes do reparo e (b) após o reparo da erosão causada pela cavitação.

FONTE: Avaliação em Turbinas Hidráulicas por Emissão Acústica (QUEIROZ, 2012).

Observa-se que, sob as mesmas condições de operação, a amplitude dos sinais da máquina, depois do reparo da erosão nas pás, é menor, o que se conclui que a cavitação interfere na adequada operação da máquina.

8.2. TÉCNICA DE VIBRAÇÃO NA ANÁLISE E MONITORAMENTO DOS EFEITOS DA CAVITAÇÃO

Todos os equipamentos rotativos, segundo GUIMARÃES (2011), quando estão em funcionamento, apresentam um nível de ruído e vibração já pré-estabelecidos, estes são originados por perturbações mecânicas que interferem no desempenho do equipamento. Quando a cavitação ocorre numa máquina, a ação desse fenômeno gera ruídos e elevados níveis de vibração, podendo ocorrer em qualquer equipamento que esteja sujeito a diferença de pressões de um fluido dinâmico, porém, quanto maior for o equipamento, maiores serão estes efeitos. Além de causar desgastes que tendem a deformar os rotores, as paredes internas da bomba e as pás das turbinas, simultaneamente o equipamento apresentará uma progressiva queda de rendimento.

A técnica de vibração visa acompanhar a qualidade de funcionamento das turbomáquinas, com base na intensidade das vibrações geradas pelo seu funcionamento. Esta se dá por monitoramento dos sinais obtidos através de sensores captadores da energia associado ao processo de vibração os quais transformam a energia mecânica de vibração em sinais elétricos e com os dados obtidos é possível fazer comparações com os de fábricas ou anteriores e, assim identificar se houve algum esforço dinâmico novo. A periodicidade destas inspeções é definida em função das horas rodadas das turbomáquinas.

“A vibração resultante da cavitação, é devida à combinação de três fatores: Como a região preenchida com bolhas varia de pá para pá, num mesmo impulsor, a passagem do escoamento em redor dessas regiões também varia, afetando o equilíbrio desse impulsor; Cada região preenchida com bolhas também sofre variações de dimensão, podendo daí resultar vibrações com frequências não constantes; Se as regiões ocupadas por bolhas forem muito extensas, causam uma queda de pressão a jusante do impulsor, resultando na saída separada e irregular do escoamento de cada canal, desequilibrando o impulsor.” (LEITE, 2012)

Os parâmetros a serem analisados nesta técnica fornecem informações que apontem inspeções em elementos específicos da máquina, os mais importantes são: amplitude do deslocamento de vibração, amplitude da velocidade de vibração, amplitude da aceleração de

vibração e frequência da vibração. Conforme estudos de MARÇAL (2005 apud COMITTI, 2015) “Após a coleta de dados, é possível uma análise técnica com a finalidade de indicar a natureza da possível falha, além de identificar os elementos críticos do sistema”.

Segundo COMITTI *et al* (2015), a coleta de dados se dá por meio de um acelerômetro, conectado a um coletor de dados. O acelerômetro é um transdutor que capta a vibração. Ele é constituído de um cristal piezoelétrico que tem a característica de enviar um sinal elétrico que é proporcional a sua deformação. Esta análise pode ser feita a partir de dois tipos de equipamentos, o primeiro de análise em frequência com filtro o qual isola as amplitudes de vibração que se apresentam a uma determinada frequência, filtrando as restantes e realizando a medição da fase do sinal vibratório. Este equipamento é associado a um medidor de velocidade angular e assim há filtragem para a velocidade de rotação do equipamento. O segundo tipo e mais utilizado, são os equipamentos com análise FFT (Fast Fourier Transform) estes monitoram e realizam o diagnóstico dos problemas existentes nas turbomáquinas sem necessidade de deslocá-las do seu local de operação, permitindo também avaliar a influência da sua instalação no comportamento vibratório apresentado. A Transformada de Fourier evoluiu para a Transformada Direta de Fourier (Direct Fourier Transform - DFT), que leva muito menos tempo na execução dos mesmos cálculos. Nem todas as frequências são calculadas com o DFT, o que resulta em uma transformação mais rápida. Neste processo o sinal é convertido para um espectro de frequência, ou seja, agora ele apresenta um sinal no domínio da frequência.

Os dados obtidos são passados para o computador, onde podem ser analisados. A análise é feita através do espectro de frequências, onde é possível distinguir as diferentes frequências, bem como a sua amplitude. Todo sinal é captado em forma de onda pelo coletor de dados, ou seja, um sinal no domínio do tempo.

O método de vibração é um método embasado pelas normas ISO 13380:2002 e ABNT NBR 10082:2011 (norma brasileira que estabelece as regras a serem utilizadas na avaliação do estado de funcionamento de máquinas rotativas, que operam entre 600 rpm e 15 000 rpm, com potência acima de 15 kW e frequência de vibração entre 10 Hz e 1 000 Hz).

9. MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DANIFICADOS PELA CAVITAÇÃO

De acordo com MACEDO (2014), processos que permitam ganho de eficiência, de um maior tempo entre manutenções e redução de custos na produção energética são cada vez mais necessários, pois auxiliam na redução de custos de manutenção e de perdas de produção em setores de produção energética. Segundo AKTHAR (apud GONÇALVES, 2007, p. 18) cerca de metade das paradas programadas são para manutenção de turbinas e de seus componentes, tendo como principal problema a erosão causada pela cavitação e o surgimento de trincas. Por conta destes desgastes, diversas falhas podem ocorrer nos equipamentos, resultando na necessidade de sua recuperação ou até na sua substituição, gerando custos que chegam a centenas de milhões de dólares, de acordo com dados do INFOSOLDA (2016). Embora as turbinas sejam projetadas para ter um máximo rendimento e durabilidade hidráulica, com vida útil geralmente estimada em torno de 60 anos, a utilização periódica dessas máquinas faz com que se desenvolva a cavitação. “Sendo um evento de ação contínua, a cavitação causa grandes perdas de massa em áreas específicas da turbina e que leva ao dano catastrófico se não forem tomadas medidas corretivas”. (MARQUES, 2003 apud MUSARDO *et al*, 2005, p. 2).

Um caminho para redução dos efeitos da cavitação é a utilização de técnicas específicas, como a escolha dos equipamentos hidráulicos de acordo com a necessidade do projeto, verificando o $NPSH_{requerido}$ e o $NPSH_{disponivel}$, além da utilização de materiais mais resistentes e nobres na fabricação desses equipamentos, como o ASTM A743 Gr CA6- Mn. Em 2000, o LABSOLDA (da onde) desenvolveu o processo MIG/MAG com pulsação térmica, ou bi-pulsado, que proporcionou, junto às usinas hidrelétricas, uma popularização das ligas austeníticas¹ com cobalto, melhorando a resistência à cavitação das áreas revestidas nas

¹ São ligas não-magnéticas de ferro-cromo-níquel contendo tipicamente 8% de níquel, com baixo teor de carbono que apresentam boas propriedades mecânicas, boa soldabilidade, trabalhabilidade a frio e resistência à corrosão. Essas ligas podem ser endurecidas por deformação e, neste estado, são ligeiramente magnéticas. A adição de elementos de liga como o molibdênio e a redução do teor do carbono melhoram sua resistência à corrosão. (MANUAL TÉCNICO DE AÇO INOXIDÁVEL, 2011).

turbinas hidráulicas, reduzindo os períodos de parada para manutenção e deposição de material. MACEDO (2014) enfatiza que, as ligas austeníticas ligadas ao cobalto, dentre elas o aço inoxidável com cobalto, são as mais vantajosas, apresentando um avanço quanto a resistência à cavitação.

Mesmo aplicando adequadamente as técnicas de projeto a cada equipamento, é possível que ocorra o desgaste destes. De acordo com INFOSOLDA (2016), o desgaste² ocasionado pelo fenômeno da cavitação ocorre devido a mudanças bruscas de pressões, formando bolhas, que, ao mudarem para uma região com diferentes níveis de pressão, implodem ou explodem, resultando em ondas de choque que causam tensões cíclicas e fadiga superficial na superfície metálica. De acordo com MACEDO (2014), a erosão ocorre devido as repetições do processo da cavitação. O desenvolvimento do processo erosivo em função do tempo de exposição, pode apresentar cinco períodos ou estágios distintos, como incubação, aceleração, máxima taxa erosiva, atenuação e estabilidade. O conhecimento desses diversos tipos de desgastes é importante para fazer um projeto adequado, a fim de um produto final que apresente uma boa resistência a esse processo. (INFOSOLDA, 2016, p. 2).

Quando se verifica a ocorrência desse tipo de problema, é importante que se analise seu grau de desenvolvimento, para que se saiba aplicar o método de recuperação adequado. MACEDO (2014), enfatiza que, mesmo que as zonas de cavitação sejam bem aparentes, ensaios de identificação de defeitos em superfícies de materiais isentos de porosidade devem ser feitos, pois podem existir regiões adjacentes a ela que já sofreram com os efeitos da cavitação, um tipo de estudo que pode ser feito é utilizando o método da capilaridade³. Com essas áreas identificadas, faz-se um mapeamento registrando a sua localização e dimensões.

O revestimento de correção pode ser executado por várias técnicas tais como eletrodeposição, pintura ou ainda, soldagem. Neste trabalho será analisado a técnica de soldagem, pois esta pode ser aplicada em variados níveis de degradação, com alcance em diferentes regiões das estruturas danificadas, além dos variados processos utilizados na fabricação e recuperação da mesma. (MRN, [s.d.]). A escolha pela soldagem também proporciona algumas vantagens ao equipamento em que é aplicada, em que pode-se citar:

² O deslocamento indesejável de material de determinada superfície. Nos metais, esse processo pode suceder-se pelo contato com outros metais, com sólidos não metálicos, com líquidos em movimento, com partículas sólidas ou partículas líquidas presentes no fluxo do fluido.

³ Poder de penetração de um líquido em locais extremamente pequenos devido a suas características físico-químicas como a tensão superficial.

“[...] melhoria da eficiência do equipamento mantendo cantos vivos nas bordas e arestas cortantes, redução no consumo de potência mantendo a capacidade de corte, redução do custo de máquinas e novas instalações possibilitando peças revestidas de baixo custo, recuperação de peças desgastadas sem necessidade de substituição, aumento da vida útil de instalações, peças e ferramentas, diminuição do tempo de parada de equipamentos e melhores soluções nos projetos de máquinas com a aplicação de materiais sobre um núcleo tenaz.” (INFOSOLDA, 2016).

GONÇALVES (2007) cita que as partes danificadas por cavitação podem ser recuperadas através da soldagem. De acordo com a classificação apresentada no CM 105/OT 204 – SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS, existem dois grupos de processos de soldagem: soldagem por pressão; e soldagem por fusão.

Na soldagem por pressão faz-se o aquecimento da área, erodida ou rompida, até um ponto em que seja possível fazer a deformação das superfícies em contato, permitindo a correção da cavidade da superfície. Na figura abaixo é apresentado como acontece a união de uma estrutura pela soldagem por pressão.

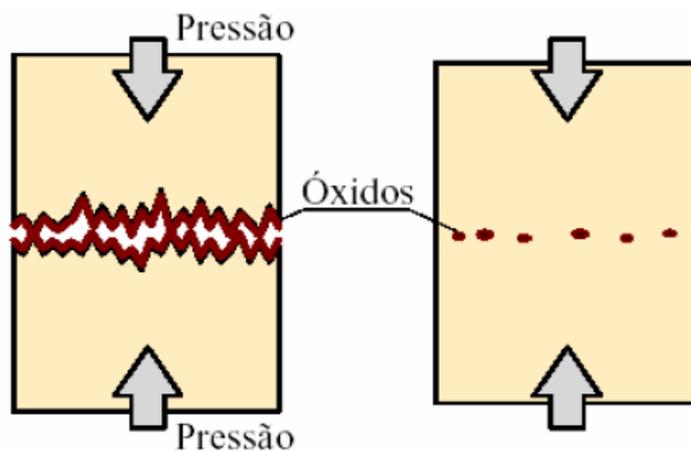


Figura 22- Soldagem por pressão.

FONTE: CM 105/OT 204 – Soldagem com Eletrodos Revestidos.

Na soldagem por fusão há a adição de material na região danificada, faz-se o aquecimento da região, possibilitando o aquecimento da estrutura e do material adicionado, tornando possível a fusão de ambos. A seguir, na Figura 23 é apresentado como acontece a união de uma estrutura pela soldagem por fusão.

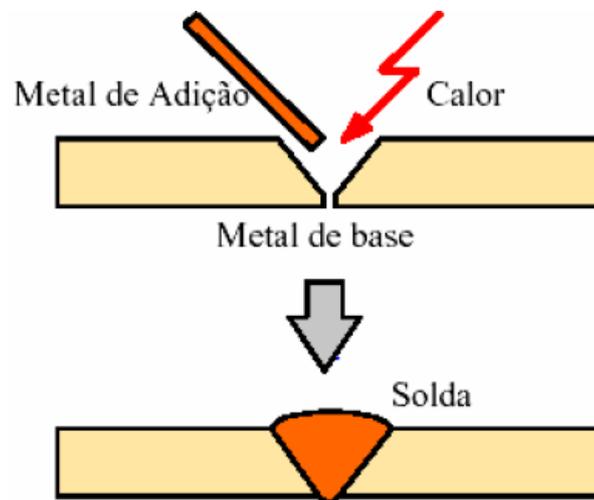


Figura 23- Soldagem por fusão.
FONTE: CM 105/OT 204 – Soldagem com Eletrodos Revestidos.

MACEDO (2014) e MUSARDO (2006) citam o processo de arco elétrico como opção de soldagem. A Soldagem TIG utiliza o arco elétrico entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Nesse tipo de soldagem o arco elétrico é criado pela passagem de corrente elétrica pelo gás de proteção ionizado, estabelecendo-se o arco entre a ponta do eletrodo e a peça. BRACARENSE (2000) apresenta os principais componentes desse processo são:

Tocha: suportam o eletrodo e conduzem o gás de proteção até o arco, são classificadas basicamente pelo seu mecanismo de refrigeração. As tochas refrigeradas a gás são mantidas na temperatura adequada pelo efeito de resfriamento causado pelo próprio gás de proteção, com corrente máxima de 200 A. As tochas refrigeradas a água promovem a circulação de água, normalmente em circuito fechado, para refrigeração, com corrente máxima de 1000 A;

Eletrodo: Os eletrodos não são consumíveis e tem o papel de servir como um dos terminais do arco que irá gerar o calor para o processo. Ao aproximar-se da sua temperatura de fusão (3410 °C), o tungstênio torna-se termiônico, como uma fonte disponível de elétrons. Ele alcança esta temperatura através de aquecimento por resistência e, caso não houvesse um forte efeito de resfriamento pela saída dos elétrons de sua extremidade, esta ponta poderia fundir-se. Os

eletrodos são classificados com base em sua composição química. São produzidos através de acabamento químico ou mecânico para remoção de imperfeições e impurezas na sua superfície.

Fonte de Potência:

Gás de proteção: são direcionados pela tocha para o arco e a poça de fusão para proteger o eletrodo e o material metálico fundido da contaminação atmosférica. Os tipos mais comuns de gases são o argônio e o hélio e as misturas entre estes, utilizadas em aplicações especiais, além de misturas com hidrogênio e nitrogênio. O argônio utilizado em processos de soldagem normalmente possui uma pureza de 99,95 %, sendo aceitável para a maioria dos metais, excetuando-se aqueles reativos ou refratários. O Hélio transmite maior calor para uma mesma corrente e tensão que o argônio e, portanto, é particularmente importante na soldagem de peças espessas ou materiais com alta condutividade térmica como o cobre.

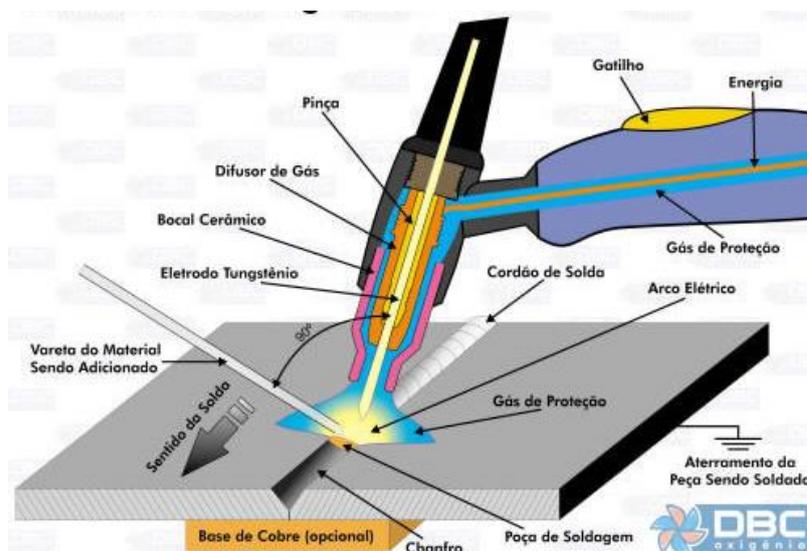


Figura 24 – Processo de soldagem TIG.

FONTE: Guia da soldagem TIG. http://soldatig.org/processo_TIG_o_que_e.htm

Segundo MUSARDO (2006), para soldagem de materiais com diferentes espessuras é indicado usar o processo de soldagem a arco gás metal MIG/MAG. Esse processo veio para substituir o revestimento por eletro revestido, pois este processo gerava altas perdas de material em função das pequenas sobras dos eletrodos, além de ser também um processo muito lento. Já o processo MIG/MAG com pulsação térmica, utilizado por MACEDO (2014), foi desenvolvido pela “dificuldade operacional na utilização dos arames tubulares a base de cobalto” e tem como vantagens uma zona termicamente afetada mais estreita, o controle da zona fundida e um curto espaço de tempo em temperaturas elevadas, na sucessão de pulso.

“[...] O processo MIG/MAG é de maior rendimento em virtude de ser um processo semiautomático, assim como a observação de um acabamento superficial de melhor qualidade em relação ao eletrodo revestido, como também a maior eficiência e com uma maior taxa de deposição, dada em kg/hora, tendo a vantagem de poder também ser usado na posição sobre cabeça. [...] este processo de soldagem permitiu também ampliar o período entre reparos das turbinas hidráulicas [...]” (MUSARDO, 2006).

Para a soldagem das áreas com profundidades de erosão com até 8mm, usa-se o revestimento com o arame tubular de aço inoxidável austenítico, e para áreas erodidas com profundidades maiores usa-se revestimentos de aço inoxidável com cobalto. (MACEDO, 2014).

Na soldagem podem ser usados diferentes materiais, como o aço inoxidável, cobalto, cromo, níquel, molibdênio e outros. Existem estudos que fazem comparações da aplicação desses diferentes materiais na soldagem, como a comparação entre o arame tubular tipo 13%Cr - 4%Ni - 0,4%Mo e do aço fundido ASTM A 743 CA-6NM. (GONÇALVES, 2007).

Outra forma de solda que pode ser encontrada é a aspensão térmica, ou metalização, que segundo NOVICKI (*et al* 2011), é um método de reparo promissor, apresentando ótimos resultados, como na sua aplicação ao amanteigamento de uma superfície com perdas de espessura antes de receber a solda (Reparo por Deposição de Solda RDS), pois esta pode danificar a estrutura, perfurando-a devido a sobrepenetração do arco voltaico e a ocorrência de trincas a frio (TF). Conforme MARQUES (2003), a aspensão térmica consiste num processo em que um material (cerâmico, metálicos ou polímero) é finamente dividido e aquecido (fundido ou semi- fundido) por arco elétrico ou por tocha de aspensão, que em seguida é depositado na superfície danificada, preparada previamente para receber o depósito, como é apresentado na figura a seguir.

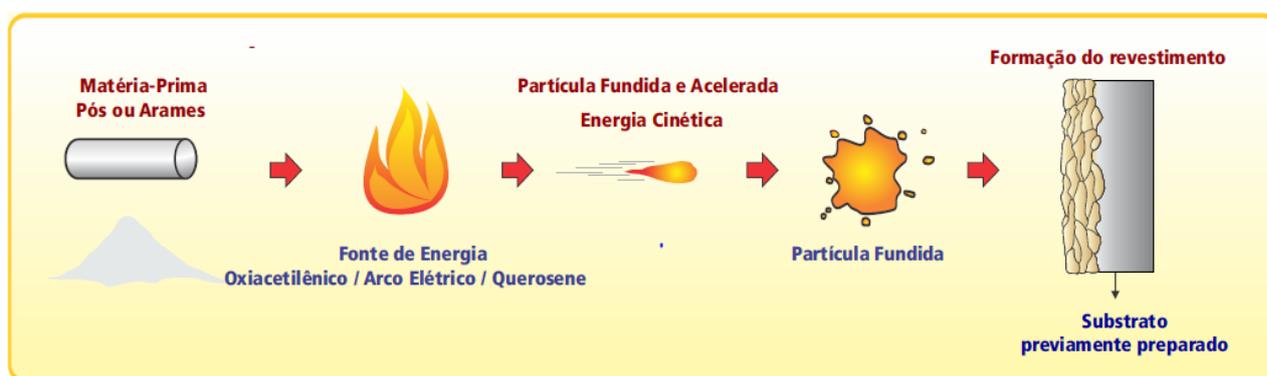


Figura 25- Processo de Soldagem por Aspensão Térmica.
FONTE: Catálogo Geral de Aspensão Térmica.

Esse processo é amplamente utilizado, tanto em fabricações quando em manutenções. E sua aplicação pode variar em função:

- **dos materiais utilizados:** Podem ser fornecidos nas formas de vareta, arame, cordão e pó. No Catálogo Geral de Aspersão Térmica especifica-se que esses materiais, ou ligas podem ser subdivididos em duas formas: a frio e a quente. A primeira, (pó ou arame) atingem no processo de aplicação no máximo 250°C. São utilizadas para revestir e recuperar peças que não podem ser aquecidas, como eixos, cilindros e chapas finas, pois estes podem se deformar com o calor ou sofrer alguma alteração metalúrgica. Neste processo a ligação se faz de forma mecânica, sem união metalúrgica; A segunda, (pó) atingem temperaturas de 860 a 1100°C, dependendo do tipo de liga, e podem ser aplicadas em peças sem risco de deformação ou alteração metalúrgica. A ligação do pó fundido com a peça se faz por difusão (Processo Chama- Pó) e por fusão (Processo PTA), obtendo ligação metalúrgica com a peça. É importante expor que nem todos os materiais para aspersão podem ser aplicados a qualquer tipo de substrato, antes de expor um substrato a esse processo, ele deve passar por uma preparação adequada, que consiste em duas etapas: limpeza da superfície e obtenção da rugosidade. A ligação entre o revestimento e o substrato é influenciada por diversos fatores como: material do revestimento, rugosidade e outros.
- **do calor aplicado:** De acordo com a fonte de calor usada o processo pode variar apresentando-se de duas formas: Combustão e Elétrico. No processo por combustão o calor utilizado é gerado pela queima de um gás combustível, onde qualquer substância que suporte temperaturas inferiores a 2760° pode passar por esse processo. Alguns dos materiais que podem ser usados são: Os arames e varetas, que são aplicados por uma tocha similar, onde estes são inseridos por roletes alimentadores na parte posterior da tocha e são fundidos por uma chama de gás combustível (acetileno é o mais usado); O pó, que é aplicado por tochas, e, devido a menores temperaturas e velocidades alcançadas pelas partículas esse revestimento tem menor resistências adesiva ao substrato, menor resistência coesiva entre as lamelas e maior porosidade, em comparação a outros processos de aspersão térmica. Para o pó, um arco elétrico também pode ser usado, mas tomando todos os cuidados necessário para que não ocorra a fusão do substrato (MARQUES, 2003).

Os processos elétricos são subdivididos em: Arco elétrico, tem com equipamentos básico “uma fonte de corrente contínua tipo tensão constante, alimentadores de arame do tipo velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gás comprimido

controlável”; Arco plasma não transferido tem o material aplicado a partir de um pó, onde um gás ou mistura passa através de um arco elétrico fixado entre um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre, que, em sua passagem, o gás é aquecido e gera um plasma, então o pó é alimentado no plasma, fundido e acelerado, e sendo direcionado ao substrato através de um jato de alta velocidade; Arco plasma transferido tem uma combinação de aspersão térmica e soldagem. Neste, o substrato deve ser um condutor, fazendo parte do circuito do arco elétrico que gera o plasma (MARQUES, 2003).

Na Figura 26 pode-se observar parâmetros (processos e materiais) que envolvem o processo de aspersão térmica.



Figura 26 – Diagrama com materiais e processos da aspersão térmica.

FONTE: Catálogo Geral de Aspersão Térmica (Castolin Eutectic,[s.d.])

Para que a solda tenha maior eficiência na resistência à cavitação e a outros problemas estruturais que possam ser corrigidos por este processo, é necessário que se garanta uma boa penetração, evitar a incidência de mordeduras e prevenir defeitos de falta de fusão, de escória e porosidade. A substituição da utilização de arames sólidos por arames tubulares similares nesse processo garante uma boa soldabilidade (GONÇALVEZ, 2007).

Para determinar a soldabilidade deve-se, primeiramente, conhecer o material que será soldado, verificar o processo e o procedimento de soldagem, além da sua aplicação, segundo Macedo (2004).

BRAND (apud MACEDO, 2014) conceitua a soldabilidade em três partes:

- **Soldabilidade operacional**, que é ligada diretamente a fabricação, a facilidade de execução da junta. Envolve as particularidades do processo de soldagem, a habilidade

do soldador, a versatilidade do processo e as características do material a ser soldado. No processo TIG a soldagem pode ocorrer em todas as posições. No processo MIG a posição fica sujeita à regulagem dos parâmetros do equipamento, que deve ser feita de maneira correta para evitar que haja descontinuidades, comprometendo o desempenho da junta soldada. Tanto o processo TIG quanto o processo MIG podem deixar de ser adequados se houver uma falha na posição de soldagem ou uma restrição de acesso à junta soldada. Pode-se citar a solda com o alumínio e suas ligas que, por questão de características, necessitam de limpeza de junta antes da soldagem, caso contrário a qualidade da junta soldada pode ser comprometida. A soldagem no cobre, que por sua condutividade térmica ser alta, necessita de cuidados como o preaquecimento em temperaturas na faixa de 500° a 700° C;

- **Soldabilidade metalúrgica** envolve as transformações de fase que ocorrem no material durante o aquecimento, a fusão, a solidificação e o seu resfriamento. Esse processo está associado com a natureza do material e com a transferência de calor da junta soldada, como o aquecimento mais intenso e crescimento de grão na região soldada, incompatibilidades entre materiais, transformações de fase. A soldabilidade metalúrgica é relacionada diretamente à metalúrgica de soldagem, podendo se apresentar de diferentes características dependendo do material;
- **Soldabilidade em serviço** diz respeito ao desempenho e à vida útil do equipamento soldado. É o objetivo final da escolha dos materiais e procedimentos corretos. Se o processo e a fabricação tiverem sucesso, forem bem executados, essa subdivisão não tem razão de existir, já que o equipamento terá vida útil dentro do projeto e dificilmente falhará em serviço.

Em Santa Catarina, FURNAS em parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR) foi desenvolvido um robô com o objetivo de fazer reparos em turbinas danificadas por cavitação. Roboturb, como é chamado, é um sistema automatizado, operado remotamente, através de um software. (REVISTA FURNAS, 2005).

O Roboturb (Figura 27) apresenta como vantagens: ser capaz de operar no pequeno espaço entre as pás, desde a sua estrutura mecânica até a arquitetura de hardware e software; ser capaz de medir os defeitos na superfície erodida e depositar por soldagem o material necessário para o reparo da cavidade; realiza uma soldagem uniforme e de melhor qualidade; a

quantidade de material depositado é reduzida, assim como o tempo de trabalho e de exposição de pessoas ao ambiente insalubre da turbina. (LRRG, 2016).

“A cada quatro anos, as máquinas de Luiz Carlos Barreto de Carvalho são paradas para manutenção, e, somente para soldar as depressões provocadas pela cavitação, gasta-se em torno de 25 dias. Com o Roboturb, podemos reduzir esse prazo para dez dias quando o processo estiver plenamente operacional.” (REVISTA FURNAS, 2005).

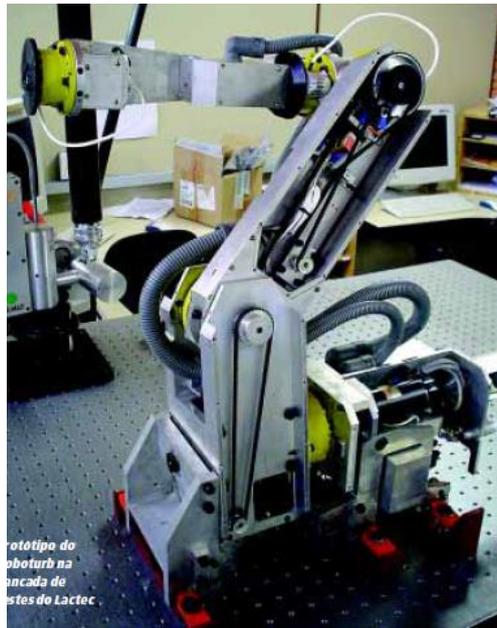


Figura 27- Roboturb.
FONTE: Revista Furnas, 2005

A figura seguinte exemplifica estruturas de turbinas danificadas pela erosão causada por cavitação.

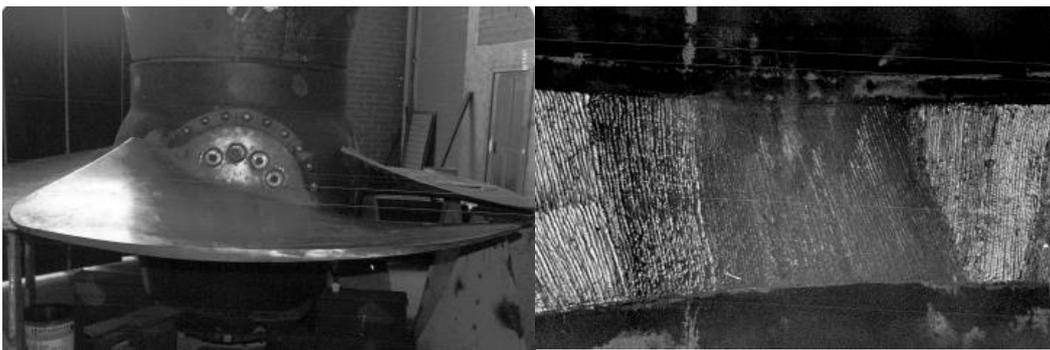


Figura 28 - (a) Pá após recuperação de borda superior e (b) Área do arco de descarga sendo tratado pelo processo de solda elétrica.

FONTE: Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan (2013).

É importante citar que, antes de iniciar-se a soldagem é essencial fazer a goivagem⁴ na superfície, pois este processo a prepara de forma a permitir uma solda de qualidade, obtendo dessa forma um chanfro adequado ao processo e espessura, e por uma utilização adequada de um suporte para a solda.

Após a goivagem é feita a esmerilhagem da área recuperada para regularizar a superfície, evitando o aparecimento de vazios na solda em função das irregularidades e cantos vivos provenientes do processo de goivagem, então realiza-se um segundo ensaio de líquido penetrante para verificar que não existem defeitos ou irregularidades nessas regiões.

A escolha do melhor processo depende de fatores de cada caso, tais como a posição de soldagem, acessibilidade, equipamentos, consumíveis e os custos de mão-de-obra, destacando que as condições nas quais os soldadores de reparo trabalham em uma usina hidrelétrica são bem distantes das ideais, se deparando com diversas complicações durante o trabalho.

A soldagem, assim como outros processos industriais, necessita de normas para sua certificação, tanto para o próprio processo quanto para quem o realizará. A ABNT publicou, em 06 de maio, a norma ABNT NBR 14842:2015 - Soldagem - Critérios para a qualificação e certificação de inspetores para o setor de petróleo e gás, petroquímico, fertilizantes, naval e termogeração (exceto nuclear), que revisa a norma ABNT NBR 14842:2003, elaborada pelo Comitê Brasileiro de Soldagem (ABNT/CB-42).

“Esta Norma estabelece os critérios e a sistemática para a qualificação e certificação de inspetores de soldagem para o setor de petróleo e gás, petroquímico, fertilizantes, naval e termogeração (exceto nuclear) e descreve as atribuições e responsabilidades para os níveis de qualificação estabelecidos”. (ABNT, 2014).

A Norma FBTS N-007- Abril de 2015 – Critérios para a Qualificação e a Certificação de Engenheiro e Tecnólogo Especialista em Soldagem.

“[...] estabelece critérios e a sistemática para a qualificação e a certificação de engenheiros e tecnólogos especialistas em soldagem, descrevendo suas atribuições e responsabilidades, seus requisitos de escolaridade e experiência, conhecimentos exigíveis e conteúdo programático mínimo”. (FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM, 2015).

⁴ A goivagem térmica é uma parte essencial da fabricação por soldagem. Usada para a rápida remoção de metais indesejados, o material é aquecido localmente e o metal fundido é expelido, geralmente soprando-o para fora. Processos normais a gás ou a arco com oxi-combustível podem ser usados para produzir rápida fusão e remoção de metais. (AIR PRODUCTS, [s.d.]).

10. CONCLUSÃO

A partir deste trabalho bibliográfico conclui-se que a cavitação é um dos problemas na mecânica que traz sérios agravantes para o funcionamento das turbomáquinas. Estes vão desde a queda de rendimento da turbomáquina, até a perda total do equipamento, isso ocorre devido as ondas dos colapsos das bolhas de vapor provocarem mudanças nas características do escoamento, o que o torna mais instável, causando oscilação, vibração e erosão no equipamento.

Estudos sobre este fenômeno físico ainda são escassos, o que dificulta o entendimento e solução dos efeitos do mesmo em máquinas hidráulicas. Na literatura a cavitação está classificada conforme as características físicas do escoamento e em função do lugar onde ocorre o colapso das bolhas de vapor, além disso há níveis de cavitação que são classificados conforme a gravidade dos seus efeitos.

Os danos a partir do efeito da cavitação estão ligados diretamente a custos financeiros como mão-de-obra para a manutenção, redução da vida útil dos equipamentos, reparo ou substituição de peças devido este fenômeno ocasionar erosões nas partes que estão em contato com fluido, paralisação dos sistemas, o que na maioria das vezes afeta o fornecimento de energia elétrica, pois a cavitação está presente principalmente neste setor (as estruturas hidráulicas das usinas hidrelétricas estão vulneráveis à cavitação, principalmente as turbinas).

Quando se trata de evitar que danos possam surgir em bombas centrífugas e turbinas hidráulicas devido a fenômenos físicos, o ideal é que desde o projeto sejam aplicadas formas de prevenção. Para evitar a cavitação, pesquisadores ressaltam a importância do cálculo de NPSH, o qual é um método preventivo que garante uma segurança e um desempenho satisfatório ao equipamento em funcionamento, deixando-o fora da zona de risco deste fenômeno. No entanto, mais do que se limitar a este recurso, nos estudos da literatura sobre este tema, verificamos que há necessidade de monitorar e analisar os sinais provenientes de anormalidades no sistema. Através desse estudo averiguamos que a cavitação provoca ruídos e/ou vibrações fora da faixa de operação normal e, através de uma análise desses parâmetros, faz-se uma comparação com dados fornecidos pelos fabricantes, possibilitando identificar qual

o momento ideal para se fazer a manutenção do equipamento e assim verificar se é preciso de reparo.

O surgimento de erosões e trincas nos equipamentos hidráulicos devido a cavitação despertou o interesse e necessidade de se ter métodos de reparo para estes problemas devido ao alto custo desses equipamentos. Um dos métodos mais utilizados para recuperação estrutural é a soldagem, podendo ser aplicada em vários níveis de degradação e com diferentes matérias. As técnicas de soldagem estudadas neste trabalho foram as por pressão, por fusão e aspensão térmica, mas antes de aplicar esse processo é necessário conhecer a soldabilidade ideal, o material que será soldado, as condições de trabalho e outros.

Ao apresentar estes aspectos, verificamos, a partir das referências utilizadas, que existem diversos estudos e pesquisas acerca do fenômeno da cavitação, mas ainda assim insuficientes para fazer um total controle ou resolver esse problema, dando possibilidade a mais pesquisas sobre o assunto, visando desenvolver formas, para cada vez mais reduzir os impactos decorrentes da cavitação, com objetivo de manter os níveis adequados de rendimento das turbomáquinas em operação, reduzir os gastos relacionados manutenção, recuperação e/ou substituição de equipamentos danificados, principalmente na área de produção de energia elétrica, já que a fonte energética do país ainda é predominantemente hidráulica.

11. REFERÊNCIAS

AIR PRODUCTS. Fabricação de Metais – Goivagem. Disponível em: <<http://www.airproducts.com.br/industries/Transportation/Automotive/automotive-Metal-Fabrication/product-list/gouging-automotive-metal-fabrication.aspx?itemId=59E413D6903644999BA6F0B9743F4C9A>>. Acessado dia: 13/05/2016.

ANEEL – P&D, Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. Nº 6. Agosto de 2015.

ANEEL- Agência Nacional De Energia Elétrica. BOLETIM MENSAL DE MONITORAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO. Brasília – DF, Janeiro de 2015.

Apostila de Treinamento MRN – Mineração Rio Do Norte. CM 105/OT 204 – Soldagem Com Eletrodos Revestidos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10082/2011. Em substituição Rio de Janeiro – RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14842/2015. Rio de Janeiro – RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6445/87. Em substituição a NBR 6445/80. Rio de Janeiro – RJ.

BARBOSA, B. H. Instrumentação, Modelagem, Controle e Supervisão de um Sistema de Bombeamento de Água e Módulo Turbina–Gerador. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 20 de Fevereiro de 2006.

BLAQUEZ,R.; BARBOSA J.C. Manutenção preditiva por análise de vibrações . In: V Congresso Brasileiro De Engenharia de Produção, 2015, Ponta Grossa, PR, Brasil.

BRACARENSE, A. Q. Processo de Soldagem TIG – GTAW. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000.

COELHO, W. R. Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2006.

COMITTI A.; KRAMER W. R.; MICHALAK E. J. MANUTENÇÃO PREDITIVA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES. Revista Mecatrônica Atual, n. 12, Editora Saber, São Paulo, 2015.

COSTA, A. S. Turbinas Hidráulicas e Condutos Forçados. [s. l.]. Março, 2003.

DANDRÉ FILHO J. G. Desenvolvimento de Equipamento para Avaliação de Erosão por Cavitação. Campinas – SP, 2002.

DBC OXIGÊNIO. Guia da Soldagem. Disponível em: <http://soldatig.org/processo_TIG_o_que_e.htm>. Acessado dia: 26/05/2016.

DUTRA J.C, OLIVEIRA M. A. de, JUNIOR R. G., BROERING C. E., SILVA R. H. G., DÍAZ V. M. V, BONACORSO N. G, PELLIZZARO F. e GONZÁLEZ A. M. R. Sistema e Processo de Soldagem – Vencendo a Erosão das Turbinas Hidráulicas de Grande Porte. Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA, 2000.

ELETROBRÁS - Bombas: guia básico / [et al.]. Brasília : IEL/NC, 2009

Eletrobras – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Técnica de Emissão Acústica. Disponível em: <<http://www.cepel.br/main.jsp?lumPageId=4028E49E313EEEFB013143F764831B02&lumS=cepelinternet.produto&CodProduto=21CF888C46055AE1014681D5DD4E314B&lumItemId=21CF888C46055AE1014681D5DD50314C>>. Acessado em: 13 de fev. 2016, 8:32:07.

ELETROBRÁS – Eletronorte. Levantamento Fotográfico. UGH 1. [s.d.].

EUTECTIC CASTOLIN. Catálogo Geral de Aspersão Térmica – Metalização. Revisão 02. São Paulo – SP.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. Norma FBTS N-007-Abril/15. Revisão 02. Critérios para a Qualificação e a Certificação de Engenheiro e Tecnólogo em Soldagem. Rio de Janeiro, RJ.

GONÇALVES, B. H. B. Estudo Comparativo da Resistência à Erosão por Cavitação do Metal de Solda Depositado por um Arame Tubular Tipo 13%Cr - 4% Ni - 0,4%Mo e do Aço Fundido ASTM a 743 CA-6NM. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.

GONÇALVES, M.D. Redimensionamento de uma Bomba Centrífuga para o Sistema de Combate a Incêndio de uma Planta Industrial. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Fevereiro 2014.

GOUVEA, M. M. R. de. ESTUDO DE CONFIABILIDADE EM BOMBAS CENTRÍFUGAS. Universidade São Francisco, Campinas – São Paulo, Dezembro de 2008.

GUIMARAES L. M. S. Diagnóstico De Avaria Em Bombas E Ventiladores Por Análise De Vibrações E Equilibragem Em Estaleiro Pelo Método Dos Coeficientes De Influência. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto – Portugal, Julho de 2011.

HACKER – TURBINAS HIDRÁULICAS E EQUIPAMENTOS. Xanxerê, Santa Catarina, 2016.

HORTA C. A; GONÇALVES, C. ; PAES A. C. Cavitação em Turbinas Hidráulicas dos Tipos Francis e Kaplan no Brasil. In: IX Encontro Regional Latino- Americano da Cigrè, 2001, Foz do Iguaçu. Anais do IX ERLAC, 2001.

HUIXUAN, S.; ZHAOHUI L.; YAXIONG B. – An On-line cavitation monitoring system for large Kaplan turbines, IEEE, 2007.

HYDRO TURBINE COMPONENTS. 2016. Disponível em: <http://www.generalturbo.eu/images/dotari/turbina_pelton.JPG>. Acessado dia: 20/04/2016.

INFOSOLDA – Novo Infosolda 4.0. Revestimento por Soldagem – Características, 2016. Disponível em: < <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/177-revestimento-por-soldagem-caracteristicas.html>>. Acessado dia: 20/05/2016.

JACQUES, R. C. Avaliação de Parâmetros de Emissão Acústica para Monitoramento de Risers Flexíveis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2009.

JÚNIOR R. L. S. Projeto Conceitual de uma Turbina Hidráulica a ser utilizada na Usina Hidrelétrica Externa de Henry Borden. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, fevereiro de 2013.

LEITE, J. Publicação de revista científica. Indústria e Ambiente, abril. 2012. Disponível em: <http://www.industriaeambiente.pt/xFiles/scContentDeployerIA_pt/docs/Doc1443.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2016.

LINHARES A. D. Observação do fenômeno da cavitação e do desgaste de rotores de latão de bombas centrífugas em instalação experimental. Ouro Preto- MG, 2011.

LOPES, L.C.N. Avaliação De Sistema Eólico-Elétrico De Bombeamento De Água. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Agosto de 2011.

LRRG, Laboratório de Robótica Raul Guenther. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2016.

MACEDO, R. V, de. Recuperação de Turbinas Hidráulicas Danificadas por Erosão Cavitacional por Soldagem com Aço Inoxidável /Cobalto. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira – SP , 2014.

MANHIQUE, S. Exame de estado, tecnologia de aproveitamento de energia hídrica. Universidade Eduardo Mondlane Faculdade De Ciências, Maputo, julho de 2012.

Manual Técnico de Aço Inoxidável. [s.l]. Revisão 09. Maio de 2011.

MARQUES P. V., Aspersão Térmica. Universidade Federal de Minas Gerais – INFOSOLDA, Minas Gerais, 2003.

MELLO, C. R. de; JUNIOR, T. Y. Escolha De Bombas Centrífugas. [s. l.: s. n.], [s. d.].

MERIGUE, R., SILVA, R. S. Estudo de Turbinas para Hidrelétrica de Roncador – Bocaiúva Do Sul. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Curitiba – PR, 2013.

MINI Usinas Hidrelétricas Alterima Geradores (MHU). Usinas Hidrelétricas Alterima. [2015?]. Disponível em: <http://www.alterima.com.br/conteudo/noticias_impresao.asp?lnCdMateria=4552.html> .Acessado dia: 12 fev. 2016, 23:40:15.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro. Janeiro de 2015.

MUSARDO, G. B., ARAÚJO, M. R. V., YAMAKAMI, W. J., VENTRELLA, V. A., GALLEGO, J. Recuperação de Turbinas Hidráulicas Cavidadas por Deposição de Revestimentos a base de Cobalto – Aspectos Microestruturais. Belo Horizonte, 2005.

NOVICKI N., BUSCHINELLI A. J de A., PAREDES R. S. C. Amanteigamento por Aspersão Térmica na Soldagem em Operação de Dutos de Pequena Espessura - Estabilidade e Penetração do Arco Voltaico. Soldag. insp. São Paulo, Vol.16, No. 3, p.243-255, Jul/Set 2011.

Parker Training - Tecnologia Pneumática Industrial M1001-1 BR- Apostila, 2008. Disponível em: < http://www.parker.com/literature/Brazil/apostila_M1001_1_BR.pdf > . Acesso em 05 de jan. 2016.

PÉREZ N. P. M. Monitoramento e Diagnose de Cavitação em Turbinas Hidráulicas Utilizando Técnicas de Vibração e Acústica. São Paulo, 1995.

PINTO, P. M. R., PUC Desenvolvimento de Metodologia de Mapas de Características dos Compressores Axiais. Rio de Janeiro, Abril de 2010.

QUEIROZ F. R. Avaliação de Cavitação em Turbinas Hidráulicas por Emissão Acústica. Belo Horizonte, 2012.

RAMOS, R. A.V; SILVA, J. B. C. Máquinas Hidráulicas e Térmicas. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Agosto de 2009. Cap. 8.

REVISTA FURNAS. Nº 325. Santa Catarina, 2005.

SANTOS, R. C. L. dos. Análise De Cavitação Em Uma Turbina Hidráulica Do Tipo Kaplan. Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio De Janeiro, RJ – Brasil, Dezembro De 2013.

SIMÃO, M.C.M. Hidrodinâmica e Desempenho em Turbinas de Baixa Potência: Concepção, Modelação e Ensaio. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico. Lisboa, Outubro de 2009.

TERRES C. F. F. Avaliação De Revestimentos De Aços Inoxidáveis Depositados Por Aspersão Térmica. Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, PR – Brasil, Julho De 2006.

Tipos de turbinas hidráulicas aplicadas às pequenas, mini e microcentrais hidráulicas. Disponível em: < <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%20ulicas/CAP%20TULO%203REV.htm> >. Acessado dia: 20/04/2016.

TRIPOD – Generalidades de la turina Pelton. Disponível em: <http://members.tripod.com/mqhd_ita.mx/u3.htm>. Acessado dia: 20/04/2016.

TURBINA PELTON. Acervo saber. [2015?]. Disponível em http://www.acervosaber.com.br/trabalhos/eletricidade1/turbin.a_pelton.php . Acessado em: 12 fev. 2016, 20:12:40.

VOITH - Turbinas Kaplan. Disponível em: <<http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-kaplan-560.html>>. Acessado dia: 20/04/2016.

WIKIWAND – Turbina Francis. Disponível em:<
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Francis_Turbine_complete.jpg>.
Acessado dia: 20/04/2016.