



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**Avaliação de Cavitação em Turbinas
Hidráulicas por Emissão Acústica**

FERNANDO RIBEIRO QUEIROZ

Belo Horizonte, JULHO de 2012.

Fernando Ribeiro Queiroz

Avaliação de Cavitação em Turbinas Hidráulicas por Emissão Acústica

Texto para o exame de qualificação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

Aos meus pais Nilo e Cidinha, meus irmãos João Paulo e
Ana Paula, meu filho Gabriel, minha querida Adriana e
aos meus avós João (in memoriam) e Maria José, pela constante
e eterna confiança, incentivo e amor...

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela existência e por nos permitir o uso da razão;

Aos meus pais Nilo e Cidinha pela criação e educação, pelos valores passados e principalmente pelo apoio e incentivo durante os momentos mais difíceis. Pais, vocês fazem parte desta conquista!

Aos meus irmãos Ana Paula e João Paulo pelo carinho que sempre tiveram por mim. Obrigado pela força!

Ao meu filho Gabriel pela paciência e entendimento em minhas ausências. Gá, obrigado por existir e por ser um filho bondoso, alegre, responsável, enfim, orgulho do papai.

Ao grande amor da minha vida, minha querida esposa Adriana, pelo incentivo constante, pela compreensão em minhas ausências e pelo cuidado especial dispensado ao Gabriel. Dri, obrigado pelo companheirismo de sempre. Amo-te muito!

Aos gerentes do Centro Técnico de Ensaios e Medições – CTE.O, Luiz Antônio Gouvea de Albuquerque e da Divisão de Oficina Eletromecânica – DOFE.O, Ruy Bicego Junior, meus agradecimentos pela confiança em mim depositada.

Aos colegas da Divisão de Oficina Eletromecânica – DOFE.O, em especial à equipe de Ensaios Não Destrutivos pela força e dedicação sempre presente nos trabalhos.

Aos colegas da Usina de Estreito – USLB.O, local de realização dos ensaios, pela presteza e atenção dispensada todas as vezes que tivemos contato.

Ao meu orientador, Eduardo Bauzer Medeiros, pela orientação, presteza e incentivo.

Ao Centro de Pesquisas Hidráulicas – CPH, na pessoa do professor Marco Túlio Corrêa de Faria, pelo material, recursos e pelo contínuo apoio.

Ao amigo Engenheiro Nestor Carlos de Moura por me ajudar a encontrar a técnica de E.A e pelo exemplo de profissionalismo.

Conhecer a si próprio é o maior saber.

(Galileu Galilei)

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
RESUMO.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo geral.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Contribuições do trabalho.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Cavitação.....	16
2.2 Aplicação das técnicas de vibração e acústica na análise e monitoramento da cavitação em máquinas hidráulicas	17
2.3 Monitoramento e diagnose de cavitação em turbinas hidráulicas.....	17
3 FUNDAMENTOS DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA NO MONITORAMENTO E DIAGNOSE DE CAVITAÇÃO	19
3.1 Cavitação.....	19
3.1.1 Tipos de cavitação.....	21
3.2 Cavitação em turbinas francis.....	23
3.3 Fundamentos de acústica.....	27
3.3.1 Propagação do som em fluidos.....	28
3.3.2 Propagação do som em sólidos.....	30
3.3.3 O som em turbinas.....	31
3.4 Emissão acústica.....	32
3.4.1 Princípios da técnica na avaliação de defeitos internos em um material.....	33
3.4.2 Princípios da técnica na detecção e monitoramento da cavitação.....	34
3.4.3 Principais parâmetros da técnica de emissão acústica.....	37
4 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	41
4.1 Descrição do protótipo.....	41
4.2 Descrição da instrumentação utilizada.....	43
4.3 Metodologia utilizada nos ensaios.....	45
4.4 Metodologia utilizada para estimar perda de massa no rotor da turbina.....	49
5 RESULTADOS.....	52

5.1	Resultados do experimento dos sinais de emissão acústica em função da localização dos sensores	52
5.2	Resultados do experimento da medição dos níveis de emissão acústica em função da potência das máquinas	55
5.3	Resultados da medição da perda de massa devido a erosão por cavitação	64
5.4	Resultados do experimento da medição dos níveis de emissão acústica no ponto ótimo de operação	66
6	CONCLUSÕES.....	70
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	ABSTRACT.....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
	APÊNDICES	
	ANEXO A – Diagrama de colinas da turbina da Usina de Estreito.....	75
	ANEXO B – Equipamento de Emissão Acústica.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Largura. [m]
B	Comprimento. [m]
L	Profundidade. [m]
H_s	Altura de suspensão. [m]
H_b	Pressão barométrica local. [Pa]
H	Queda líquida, em metros. [m]
h_v	Pressão de vapor da água na temperatura do escoamento. [Pa]
n_s	Velocidade específica.
n	Rotação da turbina. [Hz]
N	Potência da turbina. [W]
E	Energia hidráulica específica.
R	Raio de referência do rotor. [m]
Q	Vazão. [m ³ /s]
p	Pressão acústica em qualquer ponto.
p_t	Pressão instantânea em qualquer ponto.
p_a	Pressão atmosférica. [Pa]
t	Tempo. [s]
I_t	Fluxo de energia instantânea.
c	Velocidade de propagação da onda.
k	Número de onda.

g Número de onda e coeficiente de atenuação espacial.

dB Decibel.

V Tensão.

$V_{ref.}$ Tensão de referência.

Letras Gregas

σ Coeficiente de cavitação de Thoma.

ψ Coeficiente de queda.

φ Coeficiente de vazão.

ω Velocidade angular.

β Ângulo de abertura das pás móveis.

ρ Densidade do material onde a onda se propaga.

ϕ Ângulo de fase.

ξ Deslocamento longitudinal.

γ Módulo de elasticidade do material.

ε_i Densidade de energia instantânea.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 3.1 Pás com erosão por efeito de cavitação
- FIGURA 3.2 Influência da rugosidade na cavitação
- FIGURA 3.3 (A) Diagrama típico de operação de uma turbina Francis. (B) Vetores representando a cinemática do fluxo que atravessa o rotor
- FIGURA 3.4 Princípio da técnica de Emissão Acústica na avaliação de defeitos internos
- FIGURA 3.5 Princípio de detecção da cavitação utilizando emissão acústica
- FIGURA 3.6 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
- FIGURA 3.7 Sinal típico de emissão acústica
- FIGURA 4.1 Diagrama em blocos da instrumentação utilizada e local de instalação dos sensores
- FIGURA 4.2 Transdutores de emissão acústica instalados na portinhola do tubo de sucção
- FIGURA 4.3 Posição de instalação dos transdutores nos ensaios
- FIGURA 4.4 Modelo adotado para estimar perda de massa por cavitação em um rotor
- FIGURA 5.1 Contagem x Amplitude dos sinais coletados nas portinholas do Caracol e Tubo de Sucção
- FIGURA 5.2 Hits x Canal dos sinais coletados nas portinholas do Caracol e Tubo de Sucção
- FIGURA 5.3 ASL (dB) x Canal dos sinais coletados nas portinholas do Caracol e Tubo de Sucção
- FIGURA 5.4 RMS dos sinais coletados nas portinholas do Caracol e Tubo de Sucção
- FIGURA 5.5 RMS x Potência da Unidade Geradora 05

- FIGURA 5.6 RMS x Potência da Unidade Geradora 03
- FIGURA 5.7 RMS x Potência da Unidade Geradora 06
- FIGURA 5.8 Hits x Amplitude da Unidade Geradora 05 na potência de 160 MW
- FIGURA 5.9 Hits x Amplitude da Unidade Geradora 03 na potência de 160 MW
- FIGURA 5.10 Hits x Amplitude da Unidade Geradora 06 na potência de 160 MW
- FIGURA 5.11 RMS no tempo da Unidade Geradora 05 na potência de 160 MW
- FIGURA 5.12 RMS no tempo da Unidade Geradora 03 na potência de 160 MW
- FIGURA 5.13 RMS no tempo da Unidade Geradora 06 na potência de 160 MW
- FIGURA 5.14 Rotor da turbina da unidade geradora 03 com as áreas mapeadas
- FIGURA 5.15 Pá com erosão por cavitação da unidade geradora 05
- FIGURA 5.16 Pá com erosão por cavitação da unidade geradora 03
- FIGURA 5.17 Pá com erosão por cavitação da unidade geradora 06
- FIGURA 5.18 Hits x Amplitude da Unidade Geradora 06 na potência de 160 MW após reparo
- FIGURA 5.19 RMS no tempo da Unidade Geradora 06 na potência de 160 MW após o reparo
- FIGURA 5.20 Correlação entre o sinal de emissão acústica com a perda de material devido a cavitação na Unidade Geradora 06
- FIGURA 7.1 Curva do nível de E.A (Valores em RMS) em função da perda de massa da turbina

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Valores da pressão barométrica em função da altitude
TABELA 3.2	Pressão de vapor em função da temperatura da água
TABELA 4.1	Características principais da turbina Francis da Usina Hidrelétrica de Estreito
TABELA 4.2	Horas rodadas das turbinas durante os experimentos
TABELA 4.3	Características principais do equipamento utilizado nos experimentos
TABELA 5.1	Estimativa de material necessária para recompor perfil original

RESUMO

A produção da energia elétrica no Brasil é predominantemente Hidráulica e nos próximos anos o potencial hidráulico continuará sendo muito utilizado, seja através de grandes obras como as Usinas de Jirau e Santo Antônio no rio Madeira e a Usina de Belo Monte no Xingu, na construção de usinas hidrelétricas menores ou através de Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's espalhadas pelo país. Até que estas usinas entrem em operação e contribuam na geração de energia elétrica para o país, as unidades geradoras em operação necessitam atender a demanda crescente de energia. Para o atendimento desta demanda de energia, muitas usinas já instaladas estão operando em seus limites máximos ou até em sobrecarga. Como consequências muitas usinas têm operado suas turbinas com algum nível de cavitação.

O fenômeno da cavitação causa uma diversidade de problemas nas usinas hidrelétricas, tais como: erosão das pás das turbinas, vibração da estrutura, perda de rendimento, ruídos, etc. A erosão ocasionada pela cavitação altera o perfil original das pás comprometendo o rendimento da turbina, sendo necessário realizar inspeções periódicas nas pás das turbinas com o objetivo de mapear os danos causados pela cavitação, para posterior recuperação. A periodicidade destas inspeções é definida em função das horas rodadas das máquinas e não consideram o regime de carga pela qual a máquina trabalhou neste intervalo de tempo. Este fato contribui para que máquinas com as mesmas horas rodadas possuam estágios de degradação muito diferentes em função de terem trabalhado mais tempo em regimes de carga que favorecem o aparecimento da cavitação. Desta forma a inspeção baseada apenas nas horas rodadas das máquinas pode ocorrer quando o dano já está num estágio bem avançado, e com isso a indisponibilidade, o tempo de reparo e o custo da manutenção corretiva serem muito superiores quando comparados àquele caso a manutenção ocorra no tempo adequado. Diante disto, muitos pesquisadores têm estudado formas indiretas de mensurar os níveis de erosão nas pás das turbinas analisando sinais de vibração ou os próprios sons gerados internamente. A técnica de emissão acústica vem sendo muito utilizada nas pesquisas como uma ferramenta capaz de resolver este problema.

Este trabalho avalia a aplicação da técnica de emissão acústica no monitoramento e diagnose da erosão causada pela cavitação em turbinas hidráulicas. Os resultados mostram que há uma clara correlação entre os sinais de emissão acústica com o estado de desgaste das pás destas turbinas analisadas.

Palavras Chaves

Cavitação, Emissão Acústica, Pás, Turbinas, Erosão.