

# ESTIMADOR DA AGRESSIVIDADE DA CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDROELÉTRICAS BASEADO EM MODELAGEM CICLOESTACIONÁRIA

## ESTIMATOR OF AGGRESSION OF CAVITATION IN HYDRO TURBINES BASED ON CYCLESTATIONARY MODELLING

Data de entrega dos originais à redação em: 13/04/2015  
e recebido para diagramação em: 14/06/2016.

Rafael L. Marinho, D.Sc.<sup>1</sup>  
Prof. Fernando A. P. Baruqui, D.Sc.<sup>2</sup>

O presente trabalho propôs uma nova metodologia para detecção e identificação da cavitação erosiva em turbinas de geração hidroelétrica. A metodologia baseia-se na modelagem dos sinais vibracionais induzidos pela cavitação como processos cicloestacionários. Diferentes tipos de cavitação afetam diferentes partes da turbina, e induzem assinaturas vibracionais que podem ser usadas para a identificação e localização da cavitação. Adicionalmente, a agressividade da cavitação, que é seu poder erosivo, pode ser estimada com base na potência medida do sinal vibracional. Acelerômetros de alta frequência foram usados para captar os sinais em duas turbinas instaladas em uma hidroelétrica durante operação normal. A metodologia foi implementada em software e um hardware dedicado foi desenvolvido para a execução no local. Um conjunto de sinais foi sintetizado conforme a modelagem cicloestacionária, e foi usado para validação da metodologia proposta. Resultados obtidos com os sinais reais foram semelhantes aos obtidos com sinais sintetizados, e corroboraram a viabilidade do emprego da metodologia em sistemas de monitoramento da cavitação.

*Palavras-chave:* Turbinas Hidroelétricas. Agressividade da Cavitação. Cicloestacionariedade. Análise Vibracional. Cavitação Erosiva.

*This work proposed a new methodology of detection and identification of erosive cavitation in hydro turbines. This methodology is based on cyclestationary modeling of the cavitation induced vibrational signals. Different cavitation types cause damage to different turbine parts and induce different vibrational signatures, which can be employed to identify and locate the cavitation. Additionally, the cavitation aggressiveness can be estimated based on the measured power of vibrational signal. High frequency accelerometers picked up the signals from two real turbines under normal operation. The methodology was implemented in software and a specific hardware was developed to run the software locally. Signals were synthesized according to the cyclestationary modeling and employed to validate the proposed methodology. Results obtained from real signals were similar to the ones obtained from synthetic signals, and thus corroborate the feasibility of this methodology in cavitation monitoring systems.*

*Keywords:* Hydro Turbines. Cavitation Aggressiveness. Cyclostationarity. Vibrational Analysis. Erosive Cavitation.

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas em geração hidroelétrica é a cavitação erosiva. A cavitação erosiva acontece devido à queda de pressão em alguns pontos críticos do escoamento dentro das turbinas, o que estimula os *núcleos* (MØRCH, 2009) da água a crescer explosivamente e se tornarem cavidades **instáveis** preenchidas com vapor. Essas cavidades vão para regiões de recuperação de pressão, e implodem violentamente, produzindo impactos nas peças metálicas da turbina. Esses impactos produzem o **encruamento** do aço, com formação de trincas e finalmente perda de massa. As paradas de manutenção devido à cavitação podem durar semanas e custar milhares de reais, constituindo prejuízo significativo e boa parcela do custo da energia gerada.

Os impactos induzem padrões vibracionais característicos que podem ser analisados para detectar

1 Um *núcleo* pode ser entendido como um ponto fraco na estrutura molecular da água, por ex.: uma microbolha ou um sólido microscópico imerso. Os *núcleos* rompem primeiro (crescem explosivamente) ao se submeter toda a massa de água a uma tensão (abaixamento de pressão) gradualmente crescente.

1 - Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ e Programa de Engenharia Eletrônica – COPPE/UFRJ.

2 - Programa de Engenharia Eletrônica – COPPE/UFRJ.

e localizar a cavitação. Diferentes tipos de cavitação produzem erosão em diferentes locais (ESCALER *et al.*, 2006). A análise vibracional é não-invasiva, não interfere com a operação da unidade geradora, e permite obter uma estimativa da **agressividade da cavitação** (FRANC; MICHEL, 1997), apesar de não estimar diretamente a perda de massa.

### 1.1 Metodologias desenvolvidas até hoje

Farhat *et al.* (1996) empregaram análise vibracional em sinais de cavitação através da retificação de sinais filtrados em passa-banda. O método revelou que há componentes em frequências chave modulando em amplitude o sinal aleatório da cavitação, e também locais apropriados para a instalação de acelerômetros. Não foi estabelecida nenhuma correlação entre a potência do sinal retificado e a agressividade da cavitação, devido a não-similaridades entre protótipos.

Escaler *et al.* (2006) extraíram o envelope dos sinais filtrados em passa-banda empregando a transformada de Hilbert discreta. Diferentes frequências

que foram detectadas nos sinais de envelope permitiram aos autores identificar vários tipos de cavitação. Este processamento é muito similar à análise DEMON (*Detection of Envelope Modulation On Noise*), muito empregada também na detecção de barcos pela cavitação em suas hélices.

De M. e Hammit F. (1982) encontraram uma relação entre a agressividade da cavitação e a potência medida do sinal vibracional, a qual foi denominada **eficiência de erosão da cavitação**.

Bajic (2003) desenvolveu a análise vibro-acústica dos sinais de cavitação e estabeleceu uma relação entre a potência do sinal de interesse e a intensidade da cavitação para um determinado ponto de operação da máquina. A potência total do sinal  $I(P)$  foi modelada como um somatório das potências  $I_m$  de cada um dos sinais decorrentes de cada tipo de cavitação:

$$I(P) = \sum_{m=1}^M I_m \quad (1)$$

Variando-se o ponto de operação  $P$  da máquina, cada um dos termos  $I_m$  varia e alguns tipos de cavitação podem surgir e outros desaparecer, alterando a assinatura vibracional da turbina. A metodologia envolve variar propositalmente o ponto de operação da máquina, e interfere na operação da unidade geradora.

## 1.2 Apresentação da metodologia proposta

O presente trabalho consistiu na modelagem do sinal vibracional como um processo cicloestacionário em relação ao ângulo do eixo da máquina. Esta modelagem permitiu o emprego de ferramentas de análise cicloestacionária como a CMS (*Cyclic Modulation Spectrum*) e a CMC (*Cyclic Modulation Coherence*) (ANTONI, JEROME; HANSON, 2010).

Um equipamento de análise não invasiva e contínua foi desenvolvido, baseado em *software* específico (escrito em linguagem C++) e um *hardware* dedicado (um computador embarcado executando sistema operacional Linux, e uma placa de aquisição de sinais desenvolvida especificamente para este projeto). O *software* que implementou a metodologia proposta foi validado por sinais de cavitação sintetizados, e foi testado em sinais de duas turbinas instaladas em uma hidroelétrica. Tais sinais foram obtidos durante operação normal com baixíssimos níveis de cavitação. Os resultados obtidos indicaram a viabilidade de a metodologia ser empregada como um sistema de diagnóstico, detecção e monitoramento da cavitação erosiva.

## 2 CAVITAÇÃO EROSIVA EM TURBINAS

Mesmo com os fabricantes de turbinas limitando a faixa de operação das mesmas com a finalidade de manter a cavitação em **níveis aceitáveis**, isto nem sempre é conseguido, pois a demanda de geração de energia obriga muitas vezes a operação em sobrecarga ou muito longe do ponto de operação ótimo. Todas as turbinas são compostas por um rotor com um número de lâminas, e por um distribuidor com um número de palhetas guia. As frequências de modulação observadas por Farhat (1996) são sempre a frequência de passagem

das lâminas do rotor, a frequência de passagem das palhetas guia, e suas harmônicas.

Adicionalmente, o sinal portadora característico da cavitação é um sinal aleatório, impulsivo e de banda larga, descrito pelo modelo de Morozov (MOROZOV, 1969). Os inúmeros impulsos de pressão representam as implosões individuais das cavidades de vapor, as quais induzem vibrações mecânicas nas frequências de ressonância naturais das peças da turbina.

### 2.1 Tipos principais de cavitação

Escaler et al. observaram vários tipos de cavitação (ESCALER et al., 2006), que se apresentam como estruturas diferentes em termos de tamanho, forma e localização dentro da turbina. Os tipos mais erosivos, e de maior importância neste trabalho, tiveram suas assinaturas vibracionais caracterizadas:

- **Cavitação em bolhas itinerantes**, que danifica somente o bordo de fuga das lâminas do rotor no lado da sucção, além de provocar queda na eficiência da máquina. Este tipo de cavitação é caracterizado por produzir forte ruído acústico, e a frequência de modulação que o caracteriza é a frequência de passagem das lâminas (e suas harmônicas).
- **Cavitação em nuvem**, que danifica o bordo de ataque das lâminas do rotor, ou eventualmente as palhetas do distribuidor. É um tipo de cavitação com muito poder erosivo, e que pode induzir anomalias na operação da máquina. Caracteriza-se por induzir vibrações moduladas na frequência de passagem das palhetas (e suas harmônicas).

### 2.2 A cicloestacionariedade do sinal da cavitação

A cavitação erosiva em suas diversas formas é um fenômeno governado por fatores aleatórios e determinísticos. Os fatores aleatórios são microfônomenos (implosões e impactos) e os fatores determinísticos são macrofônomenos (flutuações de pressão devido à interação entre rotor e estator da máquina e ondas estacionárias no caracol), os quais modulam a taxa e a amplitude dos microfônomenos. Atualmente, com o auxílio da computação da dinâmica de fluidos (CFD), é possível simular os macrofônomenos, e modelá-los como funções periódicas da **posição angular**  $\theta$  do eixo da máquina. Para o caso particular da cavitação em bolhas itinerantes, podemos definir o sinal modulante como uma série de Fourier:

$$m_B(\theta) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} B_i e^{jbi\theta} \quad (2)$$

onde  $b$  é o número de lâminas do rotor e  $B_i$  é o coeficiente complexo de Fourier da componente de **ordem de máquina** (ANTONI, JÉRÔME, 2009)  $ib$ . De forma similar, o sinal modulante devido à cavitação em nuvem pode ser modelado como:

$$m_C(\theta) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_i e^{jvi\theta} \quad (3)$$

onde  $v$  é o número de palhetas guia do distribuidor e  $C_i$  é o coeficiente da componente de ordem de máquina  $iv$ . As ordens de máquina  $b$ ,  $v$  e múltiplos compõem um **conjunto chave de ordens de máquina**, onde estão os sinais modulantes das vibrações induzidas pela cavitação. O modelo assume que todos os sinais modulantes são não negativos para todo  $\theta$ .

O sinal vibracional estacionário, (portadora aleatória de variância constante) induzido pelas implosões pode ser modelado como sendo a resposta mecânica aos impactos:

$$c_B(\theta) = (h_B * n_B)(\theta) \quad (4)$$

onde  $c_B(\theta)$  é o sinal vibracional devido à cavitação em bolhas somente,  $n_B(\theta)$  é o sinal aleatório de pressão acústica devido às implosões (como no modelo de Morozov),  $h_B(\theta)$  é a resposta ao impulso que conecta os pontos das implosões ao ponto de instalação do acelerômetro, e  $*$  denota convolução. Similarmente, podemos deduzir para a cavitação em nuvem o sinal portadora  $c_C(\theta)$ :

$$c_C(\theta) = (h_C * n_C)(\theta) \quad (5)$$

Ambos  $h_B(\theta)$  e  $h_C(\theta)$  dependem de fatores como múltiplos percursos (pelo metal e pela água), e múltiplos modos de ressonância mecânica. Uma função não-linear produz a modulação dos sinais portadora pelos sinais modulantes, tornando a variância uma função periódica:

$$x_{SOI-B,C}(\theta) = f_{B,C}(c_{B,C}(\theta), m_{B,C}(\theta)) \quad (6)$$

As funções não lineares  $f_B$  (cavitação em bolhas) e  $f_C$  (cavitação em nuvem) são diferentes, pois os dois tipos de cavitação causam erosão em locais diferentes da turbina, e portanto, têm funções de transferência mecânica distintas e também mecanismos de modulação distintos. Finalmente, o nosso sinal de interesse é a soma dos dois:

$$x_{SOI}(\theta) = x_{SOI-B}(\theta) + x_{SOI-C}(\theta) \quad (7)$$

Como o sinal de interesse tem sua variância como uma função periódica da posição angular do rotor, ele pode ser classificado como um sinal que **exibe** (ANTONI, JÉRÔME, 2009) cicloestacionariedade de segunda ordem em relação ao ângulo do rotor.

### 2.3 Modelagem do sinal real

Sinais vibracionais reais são passíveis de contaminação por inúmeras fontes de ruído, tais como escoamento, interferência eletromagnética e atrito. O próprio gerador elétrico constitui uma fonte de ruídos vibracionais (OLLIQUINO; ISLAM; EREN, 2003).

Todo sinal vibracional de máquina rotativa é uma soma de uma componente periódica (determinística) e

uma residual (aleatória), e o sinal de interesse é parte da componente residual. O ruído do escoamento e a fricção também compõem a parte residual, mas são independentes da posição angular, o que faz o sinal de interesse a única parcela exibindo cicloestacionariedade de segunda ordem (ANTONI, JÉRÔME, 2009) em relação ao ângulo:

$$x(\theta) = x_{CS1}(\theta) + x_{CS2+}(\theta) + \eta(\theta) \quad (8)$$

A parte determinística ou puramente cicloestacionária de primeira ordem é representada por  $x_{CS1}(\theta)$ , onde  $\eta(\theta)$  representa as fontes de ruído não cicloestacionárias, e  $x_{CS2+}(\theta)$  representa as componentes aleatórias cicloestacionárias com ordem maior ou igual a dois, e inclui o sinal de interesse da cavitação e o ruído estacionário.

Não obstante, o sinal real não pode ser considerado cicloestacionário em relação ao tempo, pois a velocidade da turbina não é constante (**droop speed control**). A reamostragem angular pode corrigir as pequenas flutuações aleatórias de velocidade, apesar de os sinais **temporais** de excitação devido às implosões e as respostas impulsivas **temporais** da transferência mecânica perderem os seus significados no domínio angular. Apesar disso, a flutuação de velocidade é inferior a 1%, e provoca poucas mudanças no sinal reamostrado.

Somente a **potência** e a **similaridade espectral** entre as componentes de ordem de máquina do sinal de interesse serão levadas em conta na elaboração do estimador da agressividade da cavitação. O motivo é que diferentes tipos de cavitação causam implosões e impactos em diferentes locais na turbina, portanto induzem vibrações que se propagam por diferentes caminhos até os sensores externos (diferentes funções de transferência mecânica). Também, os sinais de pressão de excitação mecânica são diferentes, pois a cavitação em nuvem tem uma tendência de produzir pulsos mais numerosos e menos intensos que a cavitação em bolhas (KUMAR; BRENNEN, 1992).

## 3 METODOLOGIA PROPOSTA

O primeiro passo para a estimação da agressividade da cavitação é determinar o conjunto chave de frequências cíclicas ou de ordens de máquina. No presente trabalho, sinais de duas turbinas instaladas em uma hidroelétrica com  $b=11$  lâminas e  $v=24$  palhetas foram gravados durante operação normal, o que permitiu aos autores sintetizar um conjunto de sinais que mimetize os sinais reais das turbinas em estudo.

### 3.1 Aquisição de sinais reais

Dois turbinas Francis idênticas UG01 e UG02 forneceram sinais para este estudo. Os grupos turbina-gerador (TG) têm uma potência nominal de 72 MW, e velocidade de rotação nominal 2.72 Hz (163.6 rpm). A tensão gerada é alternada em 60 Hz, portanto os geradores síncronos possuem 44 polos magnéticos. Ambas as turbinas têm históricos com baixos níveis de erosão e já estavam operando há 50.000 horas sem manutenção corretiva, a qual posteriormente revelou por inspeção visual padrões de erosão característicos da

cavitação em bolhas itinerantes e da cavitação em nuvem (Figura 1a e Figura 1b). Para fins de comparação, UG01 estava operando com 67% de sua capacidade nominal (48 MW) e UG02 estava girando em vazio (0 MW), porém com o enrolamento de campo do gerador energizado. Ambas as unidades estavam sincronizadas com a rede elétrica externa.

Os sinais vibracionais foram captados por dois acelerômetros modelo 9700A da Rockwell Automation, que têm uma frequência de ressonância de 85 kHz. Os acelerômetros foram instalados em malhetes sobre as palhetas diretrizes e na tampa próxima ao eixo da turbina (ESCALER et al., 2006), pois o mancal principal estava em local inacessível. Bases de montagem de aço foram cuidadosamente usinadas e coladas com cianoacrilato nas partes de turbina, e os sensores parafusados nestas bases.

Um condicionador de sinais que realizou a filtragem *anti-aliasing* e aplicou um ganho de voltagem de 27 nos sinais dos acelerômetros. Um conversor A/D gravador digital de 16 bits  $m_B(\theta) = 1 + 0,1\cos(11\theta) + 0,1\cos(33\theta) + 0,1\cos(55\theta)$  (9) e 4 canais modelo U2542A (Agilent Technologies) conectado a um computador portátil comum gravou os sinais a 100 mil amostras por segundo. Para minimizar a captação de ruídos da rede elétrica, os dois sensores e o condicionador foram alimentados por baterias. O computador e o gravador digital foram alimentados pela rede elétrica.

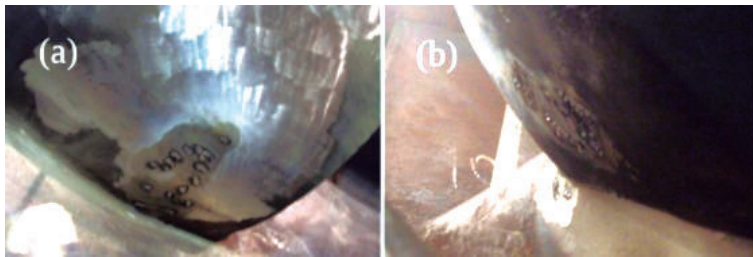


Figura 1 – Erosão causada pela cavitação. a) Cavitação em bolhas itinerantes. b) Cavitação em nuvem

Dois sinais de sincronismo foram gravados para a reamostragem: um tacômetro ótico produziu um pulso por volta do eixo, e a própria tensão alternada de 60 Hz produzida, que foi reduzida a 1 V por meio de transformadores. Estes dois sinais de sincronismo e os dois sinais dos acelerômetros formam um **conjunto de sinais**, gravado em arquivo binário único. Dois conjuntos de sinais foram gravados da UG01 e um conjunto da UG02. A Tabela 1 sumariza as principais diferenças entre os sinais gravados.

Tabela 1 - Conjunto de sinais adquiridos

Conjunto	Unidade geradora (potência)	Local do acelerômetro 1	Local do acelerômetro 2	Duração da gravação
1	UG01 (48 MW)	Malhete 5	Tampa da turbina	920 s
2	UG01 (48 MW)	Malhete 5	Malhete 4	875 s
3	UG02 <sup>a</sup> (0 MW)	Malhete 4	Malhete 5	973 s

<sup>a</sup> Unidade girando em vazio mas sincronizada com a rede elétrica

### 3.2 Produção de um sinal sintético por software

Um sinal sintético simplificado foi  $\hat{x}(t)$  proposto para simulação por computador, baseado nas equações (2) a (8). A frequência de revolução nominal do eixo das

turbinas é 2,7272 Hz, portanto, as frequências esperadas das componentes modulantes são 30 Hz para a cavitação em bolhas e 65,45 Hz para a cavitação em nuvem, além de suas harmônicas. Foram simuladas 900 revoluções do eixo da turbina.

Os sinais de excitação  $n_b(\theta(t))$  e  $n_c(\theta(t))$  podem ser simulados com boa aproximação por um ruído branco gaussiano (ANTONI, J.; HANSON, 2012). As respostas impulsivas  $h_b(\theta(t))$  e  $h_c(\theta(t))$  (funções de transferência mecânica) foram simuladas por filtros IIR passa-banda, e os sinais resultantes da filtragem representaram as portadoras vibracionais  $c_b(\theta(t))$  e  $c_c(\theta(t))$ .

Os sinais modulantes da cavitação em bolhas e em nuvem foram modelados por duas séries de Fourier, de modo que apresentassem semelhança com sinais já observados (ESCALER et al., 2006):

$$m_c(\theta) = 1 + 0,2\cos(24\theta) \quad (10)$$

Finalmente, uma função não linear simulou o efeito da modulação. A raiz quadrada foi introduzida para que  $m_b(\theta)$  e  $m_c(\theta)$  modulassem diretamente a potência (ou variância) das portadoras aleatórias:

$$f_{B,C}(c_{B,C}(\theta), m_{B,C}(\theta)) = c_{B,C}(\theta)\sqrt{m_{B,C}(\theta)} \quad (11)$$

Portanto, o sinal de interesse simulado para ambos os tipos de cavitação é:

$$\hat{x}_{SOI}(\theta) = c_B(\theta)\sqrt{m_B(\theta)} + c_C(\theta)\sqrt{m_C(\theta)} \quad (12)$$

Finalmente, a flutuação aleatória de velocidade da turbina foi simulada por uma função  $\theta(t)$ , que possibilitou a representação do sinal de interesse simulado no domínio do tempo. Um ruído branco gaussiano aditivo

$\eta_s(t)$  com densidade espectral de potência  $3 \cdot 10^{-4}$  V<sup>2</sup>/Hz e um ruído tonal aditivo  $\eta_r(t)$  composto por dois sinais senoidais em 30 e 40 kHz e potência  $7,5 \cdot 10^{-2}$  V<sup>2</sup> também foram incluídos a fim de compor um sinal temporal semelhante aos sinais reais. O modelo completo para o sinal simulado é:

$$\hat{x}(t) = \hat{x}_{SOR}(\theta(t)) + \hat{\eta}_T(t) + \hat{\eta}_S(t) \quad (13)$$

### 3.3 Metodologia de estimação da agressividade da cavitação

A obtenção de uma estimativa da agressividade da cavitação a partir de sinais temporais começa com a reamostragem angular baseada em interpolação com a função *sinc* (SMITH; GOSSETT, 1984), e que resulta em um novo sinal com número constante  $L$  de amostras por revolução do eixo. Os sinais são sobreamostrados de modo que  $L$  seja um múltiplo inteiro de  $N$ , que é uma potência de dois. Esta característica de  $L$  é importante para a próxima etapa, onde serão empregadas janelas de análise com comprimento  $N$ . No caso das unidades UG01 e UG02, a taxa de amostragem é aumentada para 122880 amostras/s, o que corresponde a  $L=45056$  amostras por volta.

#### 3.3.1 Remoção da parte cicloestacionária de primeira ordem

Seja  $x[n]$  o sinal reamostrado de um sensor arbitrário. A remoção da parte cicloestacionária de primeira ordem (ANTONI, JÉRÔME, 2009) pode ser realizada subtraindo a **média sincronizada**, que é um estimador da parte determinística do sinal:

$$x_{CS1}[n] = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} x[kL + m] \quad (14)$$

onde  $K$  é o número de revoluções gravadas e  $m$  é o resto da divisão entre  $n$  e  $L$ . O sinal **resíduo** é a diferença:

$$x_r[n] = x[n] - x_{CS1}[n] = x_{CS2+}[n] + \eta[n] \quad (15)$$

#### 3.3.2 Realce da componente pura cicloestacionária de segunda ordem

A parcela não cicloestacionária  $\eta[n]$  pode ser atenuada através de uma segunda operação de média sincronizada, mas com a potência instantânea discriminada por faixas de frequência espectral, nomeadamente *Averaged Instantaneous Power Spectrum* (AIPS) (URBANEK et al., 2012), o qual será necessário para posterior discriminação em ordens de máquina.

O AIPS é calculado com base na FFT do sinal residual:  $x_r[n]$  é dividido em  $K$  segmentos, onde  $K$  é o número de revoluções completas do eixo. Para cada segmento, uma janela de análises  $w[n]$  com  $N$  amostras é introduzida e deslocada em passos de  $R$  amostras ( $R < N$ ). A janela deslocada  $w_N[n] = w[n - iR]$ , que tipicamente é do tipo *Hanning*, seleciona um bloco o  $K$ -ésimo segmento

que compreende as amostras  $n=iR, \dots, iR+N-1$ , e a FFT do produto  $x_r[n]w_N[n]$  é computada. O resultado é uma matriz complexa com  $I=1+(L-N)/R$  colunas e  $N/2+1$  linhas, a **transformada discreta de Fourier de tempo curto** (STFT). O espectro de potência instantâneo (IPS) do  $K$ -ésimo segmento é:

$$IPS_K[i, h] = \left| \sum_{n=iR}^{iR+N-1} x_r[n] w_N[n] e^{j2\pi h \frac{n-iR}{N-1}} \right|^2 \quad (16)$$

A operação quadrática torna possível a discriminação de sinais cicloestacionários de segunda ordem, sendo  $i$  a variável discreta da posição angular, e  $h$  a **frequência espectral** discreta. Janelas com  $N=512$  amostras foram adotadas para as análises dos sinais de UG01 e UG02, o que resulta em uma resolução no domínio angular suficiente para discriminar eventos induzidos por uma única lâmina do rotor ou palheta do distribuidor. Finalmente, o AIPS é calculado como a média dos IPSs de cada revolução:

$$AIPS[i, h] = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} IPS_k[i, h] \quad (17)$$

#### 3.3.3 Discriminação das componentes de ordem de máquina

O sinal cicloestacionário de segunda ordem **puro** pode ser analisado por ferramentas apropriadas com a CMS e a CMC. Ambas evidenciam a modulação em amplitude e revelam periodicidades escondidas nos sinais aleatórios. Neste trabalho, a CMS é obtida pela computação da FFT do AIPS, o que transforma o domínio angular no novo domínio da **ordem de máquina**:

$$CMS_x[a, h] = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^{I-1} AIPS[i, h] e^{j2\pi a \frac{i}{I-1}} \quad (18)$$

onde a variável discreta  $a$  representa o domínio da ordem de máquina e  $CMS_x[0, h]$  é uma estimativa do espectro discreto de potência, que só representa a parcela estacionária do sinal. Finalmente, a CMC é o branqueamento da CMS:

$$CMC_x[a, h] = \frac{CMS_x[a, h]}{CMS_x[0, h]} \quad (19)$$

A CMC é uma matriz complexa, e o significado da magnitude de cada elemento é o **grau de cicloestacionariedade**. A imagem formada por  $|CMC_x[a, h]|$  constitui um indicador visual da presença de cicloestacionariedade.

### 3.3.4 Estimador da agressividade da cavitação

A imagem formada por  $|CMS_x[a, h]|$  constitui a representação da potência  $|CMS_x[a, h]|$  do sinal distribuída entre componentes espectrais e de ordem de máquina, portanto o sinal da cavitação deve aparecer como linhas descontínuas nas ordens de máquina esperadas. Os padrões de descontinuidade dependem da excitação acústica e da função de transferência mecânica ligando a excitação ao sensor.

O estimador da agressividade da cavitação em bolhas itinerantes é construído primeiro tomando a componente de ordem de máquina  $b$  como referência de distribuição espectral e acumulando todas as potências desta componente. As potências das componentes  $mb$  ( $m$  é um inteiro maior que 1) também são acumuladas se houver similaridade espectral com a componente de referência, o que pode ser avaliado pelo coeficiente de correlação de Pearson (PPMCC) entre as duas distribuições de potência espectral discreta.

$$P_B = \sum_m \sum_h |CMS_x[a = mb, h]| \quad (20)$$

O estimador para a agressividade da cavitação em nuvem é construído de maneira similar, tomando-se como referência a componente de ordem de máquina  $v$ :

$$P_C = \sum_m \sum_h |CMS_x[a = mv, h]| \quad (21)$$

Finalmente, ambos  $P_B$  e  $P_C$  são divididos pela potência da componente estacionária, o que resulta na porcentagem da potência que é modulada devido a ambos os tipos de cavitação:

$$P_{B\%,C\%} = \frac{P_{B,C}}{\sum_h |CMS_x[0, h]|} \quad (22)$$

### 3.3.5 Desenvolvimento de um software estimador da agressividade da cavitação

Os autores desenvolveram um *software* que implementa todos os passos do processamento descrito nas seções 3.3 a 3.3.4, e plota  $|CMC_x[a, h]|$ . O *software* também produz um relatório de texto conciso com os estimadores das agressividades da cavitação em bolhas itinerantes e em nuvem. Na Figura 2 a metodologia implementada em *software* é detalhada em um diagrama de blocos que discrimina as etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os conjuntos de sinais reais e o conjunto de sinais sintéticos foram processados pelo *software* desenvolvido e os estimadores calculados são mostrados na Tabela 2. Para o PPMCC, o valor 0,6 foi escolhido como limiar para decisão de similaridade espectral, o que resultou na melhor discriminação possível entre os dois tipos de cavitação e outros sinais interferentes.

### 4.1 Conjunto de sinais sintéticos

Dois sinais  $\hat{x}_1(t)$  e  $\hat{x}_2(t)$  foram produzidos, e compõem o conjunto de sinais sintéticos. Ambos os sinais contêm ruído branco Gaussiano aditivo com potência  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ V}^2$ . Adicionalmente,  $\hat{x}_2(t)$  também contêm dois ruídos tonais em 30 e 40 kHz e potências  $7,5 \cdot 10^{-2} \text{ V}^2$ . A soma das potências dos sinais de interesse para cavitação em bolhas e em nuvem é  $7 \cdot 10^{-2} \text{ V}^2$ . Os gráficos com as magnitudes das CMCs estão na Figura 3, onde se podem ver três linhas verticais contínuas (nas ordens de máquina 11, 33, e 55) representando a cavitação em bolhas e uma (na ordem de máquina 24) representando a cavitação em nuvem. O ruído tonal causa pouco impacto nos resultados.

De acordo com as equações e,  $P_B$  contribui com 30% da potência de  $c_b(\theta)$  e  $P_C$  com 20% de  $c_c(\theta)$ . As potências de  $c_b(\theta)$  e  $c_c(\theta)$  são respectivamente  $3 \cdot 10^{-2} \text{ V}^2$  e  $4 \cdot 10^{-2} \text{ V}^2$  significando que os **valores verdadeiros convencionais** de  $P_B$  e  $P_C$  são  $9 \cdot 10^{-3} \text{ V}^2$  e  $8 \cdot 10^{-3} \text{ V}^2$ .

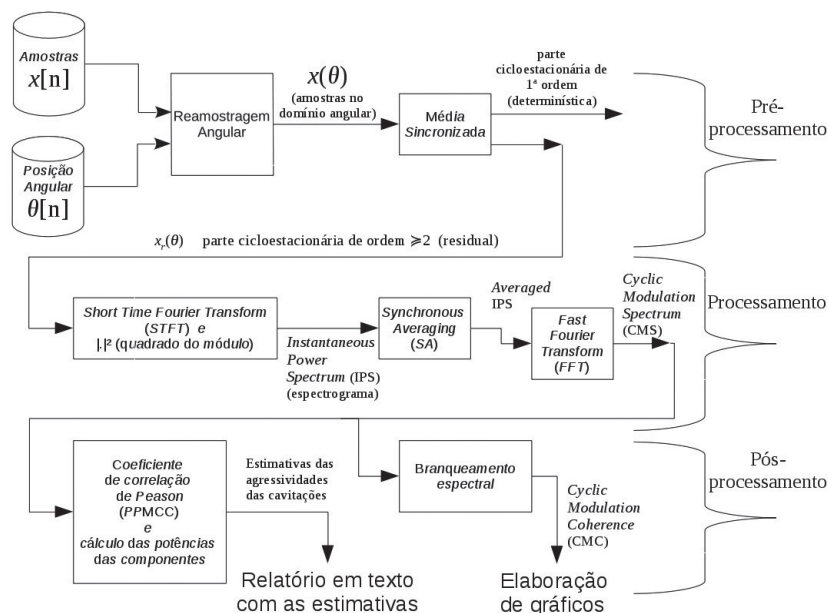


Figura 2 – Diagrama de blocos do processamento implementado em *software*

Tabela 2 - Estimadores da agressividade da cavitação computados

Conjunto de sinais	Acelerômetro	$P_B (V^2)$	$P_{B\%}$	$P_C (V^2)$	$P_{C\%}$	Potência total ( $V^2$ )
Sintético	$\hat{x}_1(t)^a$	8.76 m	10.37%	7.70 m	9.12%	84.45 m
	$\hat{x}_2(t)^a$	9.11 m	3.88%	7.69 m	3.28%	234.6 m
1 (UG01)	1	0.113 m	6.38%	0.046 m	2.61%	1.786 m
	2	0.162 m	11.96%	0.037 m	2.73%	1.361 m
2 (UG01)	1	0.109 m	8.27 %	0.041 m	3.08%	1.318 m
	2	0.098 m	1.83 %	0.029 m	0.54%	5.389 m
3 (UG02)	1	0.007 m	0.56 %	0.008 m	0.65%	1.289 m
	2	0.010 m	6.01%	0.003 m	1.93%	0.169 m

<sup>a</sup> Refere-se a sinais sintéticos e não a acelerômetros.

Para o sinal  $\hat{x}_1(t)$  os valores medidos de  $P_B$  e  $P_C$  apresentam **erros relativos de medição** de -2.67% e -3.75%, e os valores de  $P_B$  e  $P_C$  são detectados separadamente, mesmo sob um ruído estacionário considerável. Já para  $\hat{x}_2(t)$ , os resultados da Tabela 2 e da Figura 3 confirmam a pouca influência que a adição de ruídos tonais tem nesta medição.

### 4.2 RESULTADOS OBTIDOS DA UG01

Na Figura 4 estão os gráficos das CMCs computadas para o primeiro conjunto de sinais reais, com os sinais de frequência inferior a 5 kHz eliminados. Nota-se que há linhas nas ordens de máquina esperadas, e também fortes componentes de ruído nas ordens de máquina 22, 44 e múltiplas. Para o segundo conjunto de sinais reais gravados de UG01, resultados similares podem ser vistos na Figura 5, e as componentes de ruído são ainda mais intensas.

Os sinais característicos da cavitação em bolhas estão visíveis na Figura 4, nas ordens de máquina 11, 33, 55 (fraco), e 77 (muito fraco). A componente de ordem de máquina 24 sugere que há cavitação em nuvem, e há também uma componente na ordem de máquina 25 (somente Figura 4a), que é característica de vórtices de Von Kármán (AUSONI et al., 2007) interferindo na cavitação em nuvem. A Figura 5 mostra resultados para o segundo conjunto de sinais que são consistentes com os mostrados na Figura 4a e as linhas correspondentes da Tabela 2 corroboram os resultados sobre a agressividade da cavitação em bolhas e em nuvem. A instalação de um sensor próximo ao eixo da máquina torna a detecção da cavitação em bolhas mais viável, mas impossibilita a detecção da cavitação em vórtices de Von Kármán.

Posteriormente, os autores descobriram que as fortes componentes de ruído nas ordens de máquina 22, 44 e múltiplas são provenientes do gerador elétrico, devido ao material magnético apresentar **ruído Barkhausen** e **magnetostricção**. Estes efeitos combinados constituem uma fonte de ruído Barkhausen mecânico (P. MACIAKOWSKI et al., 2012) que é modulado na **frequência da rede elétrica** e na **frequência de passagem dos polos magnéticos**. Este ruído não é

intermitente como o sinal característico da cavitação. Infelizmente estas componentes de ruído mascararam algumas componentes do sinal da cavitação em bolhas, e a estimativa da agressividade da cavitação pode ser tendenciosa em algum grau.

### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS NA UG02

Os resultados das CMCs computadas para o conjunto de sinais gravados na UG02 são mostrados na Figura 6. As componentes de ordem de máquina características da cavitação em bolhas e em nuvem estão ausentes.

A Tabela 2 revela que os valores medidos de  $P_B$  e  $P_C$  estão a uma ordem de grandeza abaixo dos medidos na UG01, apesar de a potência total permanecer na mesma ordem de magnitude. Pode-se concluir que, apesar de a metodologia detectar o ruído do gerador, a cavitação em bolhas e em nuvem está ausente na UG02.

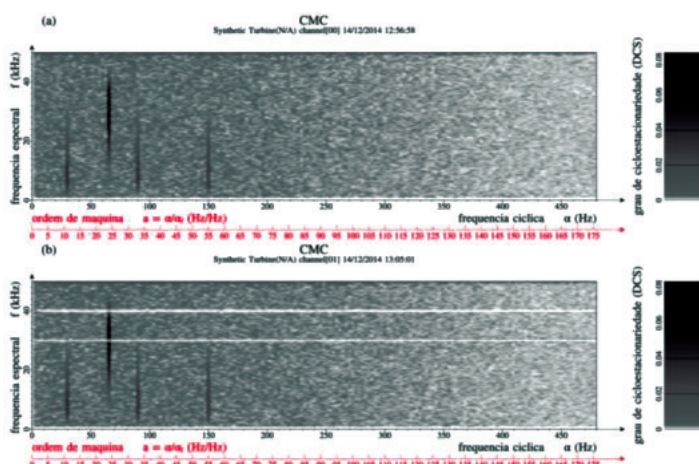


Figura 3 - Resultados obtidos com sinais sintéticos. a) Sinais de interesse e ruído branco Gaussiano aditivo. b) Sinais de interesse com ruído branco Gaussiano aditivo e ruídos tonais em 30 e 40 kHz

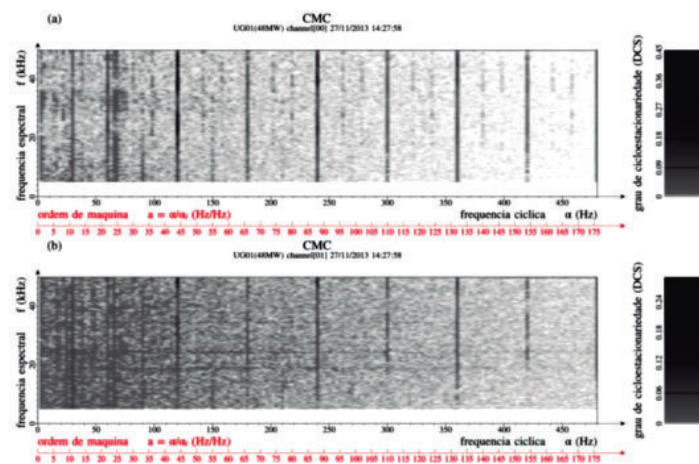


Figura 4 - Resultados obtidos com o primeiro conjunto de sinais de UG01. a) Acelerômetro sobre o malhete. b) Acelerômetro sobre a tampa da turbina. Notar linhas em 30 Hz (cavitação em bolhas) e 65.45 Hz (cavitação em nuvem)

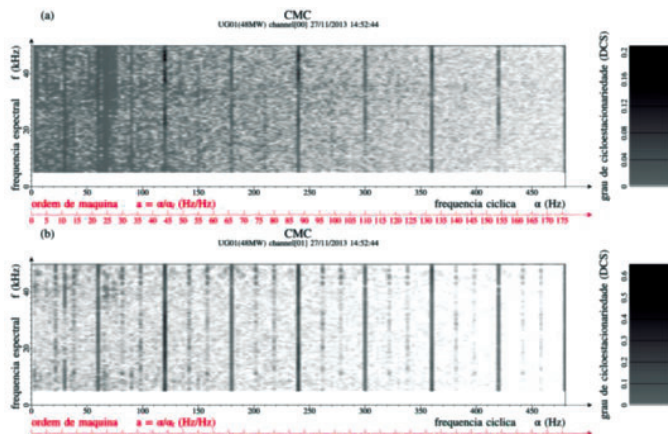


Figura 5 - Resultados obtidos com o segundo conjunto de sinais de UG01. a) e b) Acelerômetros sobre os malhetes. Notar linhas em 30 Hz (cavitação em bolhas) e 65,45 Hz (cavitação em nuvem) e forte interferência em múltiplos de 60 Hz

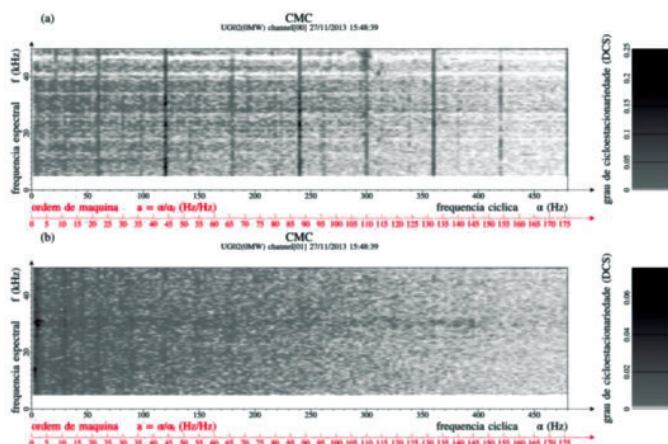


Figura 6 - Resultados obtidos com o conjunto de sinais de UG02. a) e b) Acelerômetros sobre os malhetes. Notar forte interferência em múltiplos de 60 Hz, mas sem os sinais esperados em 30 e 65,45 Hz

## 5 CONCLUSÕES

A metodologia proposta é apropriada para a detecção da cavitação e estimação da sua agressividade, mesmo em meio a várias fontes de ruído. Diferentes tipos de cavitação produzem não só componentes com diferentes ordens de máquina (modulante), mas também com diferentes composições espectrais (portadora). Para cada tipo de cavitação há somente uma combinação de portadora aleatória e modulante que a identifica.

A CMC e as potências extraídas dos sinais de interesse permitem o diagnóstico e identificação da cavitação em turbinas, mesmo com baixos níveis de agressividade da cavitação. Apesar de não ser um processamento em tempo real propriamente dito, como a metodologia DEMON, e de ter um custo computacional muito mais elevado, esta metodologia não é empírica e não envolve filtragem em banda passante, preservando as informações escondidas nos sinais. Não obstante, a metodologia proposta não interfere com a operação normal das unidades geradoras e não é invasiva.

## REFERÊNCIAS

ANTONI, J.; HANSON, D. Detection of Surface Ships From Interception of Cyclostationary Signature With the Cyclic

Modulation Coherence. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**. v. 37, n. 3, p. 478–493, jul. 2012.

ANTONI, Jérôme. Cyclostationarity by examples. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 23, n. 4, p. 987–1036, maio 2009.

ANTONI, Jerome; HANSON, David. **Detection of Propeller Noise under Low SNR with the Cyclic Modulation Coherence (CMC)**. 2010, Lyon, France: Société Française d'Acoustique, 2010. p.12–16.

AUSONI, Philippe et al. Cavitation Influence on von Kármán Vortex Shedding and Induced Hydrofoil Vibrations. **Journal of Fluids Engineering**. v. 129, n. 8, p. 966, 2007.

BAJIC, Branko. Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation. **Journal of Hydraulic Research**. v. 41, n. 1, p. 87–96, jan. 2003.

DE, M. K.; HAMMITT, F. G. New Method for Monitoring and Correlating Cavitation Noise to Erosion Capability. **Journal of Fluids Engineering**. v. 104, n. 4, p. 434, 1982.

ESCALER, Xavier et al. Detection of cavitation in hydraulic turbines. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 20, n. 4, p. 983–1007, maio 2006.0888-3270.

FARHAT, M.; BOURDON, P.; LAVIGNE, P. **Some hydro Quebec experiences on the vibratory approach for cavitation monitoring**. 1996, Lausanne, Switzerland: [s.n.], 1996. p. 151–161.

FRANC, Jean-Pierre; MICHEL, Jean-Marie. Cavitation erosion research in France: the state of the art. **Journal of Marine Science and Technology**. v. 2, n. 4, p. 233–244, dez. 1997.

KUMAR, S; BRENNEN, CE. **Harmonic cascading in bubble clouds**, 1992.

MØRCH, K.A. Cavitation Nuclei: Experiments and Theory. **Journal of Hydrodynamics, Ser. B** v. 21, n. 2, p. 176–189, abr. 2009.

MOROZOV, V. P. Cavitation noise as a train of sound pulses generated at random times. **SOVIET PHYSICS ACOUSTICS**. n. 14, p. 361–365, 1969.

OLIVINO, R; ISLAM, S; EREN, H. **Effects of Types of Faults on Generator Vibration Signatures**. 2003, [S.l.: s.n.], 2003. p.1–6.

P. MACIAKOWSKI et al. **Measurements of the mechanical Barkhausen noise in ferromagnetic steels**. 2012, [S.l.: s.n.], 2012. p. 221–228.

SMITH, Julius O.; GOSSETT, P. **A flexible sampling-rate conversion method**. 1984, [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1984. p. 112–115.

URBANEK, Jacek et al. Application of averaged instantaneous power spectrum for diagnostics of machinery operating under non-stationary operational conditions. **Measurement** v. 45, n. 7, p. 1782–1791, ago. 2012.