



## Apresentação de casos para metodologias de determinação de parâmetros modais de rotores submersos em fluídos de elevada densidade

Abdel-Rahman KM†, Borges FDDM†

†*Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil.*

**Resumo.** O estudo do comportamento modal de rotores de turbinas hidráulicas pode ser utilizado para auxiliar na compreensão dos mecanismos de falhas e defeitos que ocorrerem durante sua operação. A análise deste componente engloba conceitos da área de dinâmica e vibrações mecânicas, com a utilização de métodos lastreados em simulações numéricas e procedimentos experimentais. A análise teórica apresenta os conceitos matemáticos relacionados às estruturas e as equações que representam a resposta do conjunto às vibrações naturais e forçadas, enquanto a análise experimental determina de maneira precisa os parâmetros modais do sistema a partir dos resultados de um ensaio de impactação. A Análise Modal Operacional (*Operational Modal Analysis - OMA*), por sua vez, utiliza estimadores e diversas etapas de decomposição em sinais reais de vibração para a determinação das mesmas grandezas do sistema em operação, porém, dispensando a necessidade de uma excitação externa. Dada a relevância do tema, foram reunidos neste trabalho os principais casos práticos disponíveis na literatura acerca da determinação de parâmetros modais de rotores submersos de turbinas hidráulicas. A pesquisa foi conduzida utilizando a metodologia Prisma, sendo os resultados da triagem subdivididos de acordo com o método empregado na determinação dos parâmetros modais. Por meio desta abordagem verificou-se a predominância dos métodos experimentais.

**Palavras-chave.** *Análise teórica, análise experimental, simulação numérica, parâmetros modais, turbina hidráulica.*

### 1 Introdução

O estudo da dinâmica de rotores submersos encontra vasta aplicação, abrangendo desde bancadas de estudo de pequeno porte até os rotores de turbinas hidráulicas. A análise de suas características e de seu comportamento dinâmico em operação norteiam a escolha das técnicas de manutenção adequadas.

Os rotores presentes em turbinas hidráulicas, por exemplo, são responsáveis pela geração de cerca de 21% da produção mundial de energia. Tais equipamentos são compostos por um conjunto de lâminas que apresentam um complexo comportamento modal, avaliado ainda durante a fase de projeto por meio de simulações numéricas e análises experimentais.

Entre os tipos de turbinas hidráulicas mais conhecidos estão a Francis, Kaplan e Pelton, com destaque para a primeira, que além de ser a mais conhecida, também é amplamente utilizada e estudada atualmente. Os rotores destas turbinas apresentam comportamentos modais distintos quando envoltos no ar ou submersos em água, sendo de fundamental importância o conhecimento do efeito do tipo de fluido sobre o sistema, uma vez que a adoção de hipóteses incorretas pode resultar em um projeto inadequado do rotor, elevada severidade de vibração durante a operação e, em último caso, falha catastrófica (DEHKHARQANI et al., 2018). As predições analítica e experimental, a análise modal, as simulações fluidodinâmicas, acopladas ou não à interação fluido estrutura, e os métodos de elementos finitos são algumas das abordagens extensivamente revisadas na literatura para verificação deste efeito (TRIVEDI, 2017; DEHKHARQANI et al., 2018). Contudo, nenhum dos trabalhos publicados até o momento discutiu as metodologias experimentais mais recentes, como a Análise Modal Experimental, do inglês *Operational Modal Analysis* (OMA), por exemplo.

Visando preencher esta lacuna, este trabalho irá utilizar a metodologia Prisma para revisar e ampliar as contribuições dadas por Trivedi (2017) e Dehkhargani et al. (2018) incluindo, para tanto, as metodologias mais recentes nos critérios de seleção.

A estrutura deste artigo foi dividida nos seguintes capítulos:

- 1) Introdução: mencionada anteriormente, no qual apresentou os conceitos iniciais referentes a este trabalho;
- 2) Metodologia: explicação referente ao método aplicado para a revisão dos artigos;
- 3) Análise Experimental: revisão dos artigos como método de estudo predominante a análise experimental aplicada em estruturas submersas;
- 4) Simulação Numéricas: revisão dos artigos como método de estudo predominante os diferentes tipos de simulação numérica aplicadas em estruturas submersas;
- 5) Conclusão: capítulo final, no qual revisa e conceitua todos os estudos realizados para a análise de sistemas dinâmicos submersos.

## 2 Metodologia

A metodologia utilizada foi baseada nos Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses – PRISMA*), nos quais foram selecionados adequadamente os artigos para revisão referentes a este trabalho. Para filtrar os artigos, foram considerados os trabalhos referentes ao estudo dinâmico das estruturas rotativas que se encontram submersas tanto no ar quanto na água, como bancadas de pequeno porte e até mesmo turbinas hidráulicas., entre os anos de 2006 e 2022 Estas estruturas apresentam um comportamento dinâmico particular e a realização de seu estudo pode variar desde análises experimentais quanto numéricas.

Durante o processo de pesquisa em revistas, foram consideradas palavras-chave para selecionar possíveis artigos relacionados ao conteúdo em estudo. Todos os artigos selecionados apresentaram como língua original a inglesa, portanto entre as palavras-chave utilizadas, foram: *added mass effect*, *rotordynamics*, *Francis turbines*, *Kaplan turbines*, *modal analysis*, *Operational Modal Analysis*, *Experimental Modal Analysis*, CFD e FEM.

Dados os artigos selecionados a partir das palavras-chave, estes foram separados a partir dos critérios de inclusão e exclusão. Os critérios de inclusão foram divididos em simulações numéricas e análises experimentais, sendo cada um destes critérios o tipo de estudo realizado sobre as estruturas submersas. Os critérios de exclusão descartaram os artigos como referência final para este trabalho, sendo aqueles duplicados, ou com publicações anteriores ao ano de 2006. Ao final, somente os artigos selecionados pelo critério de inclusão foram considerados para a elaboração deste trabalho.

### 3 Análise Experimental

As análises experimentais são realizadas a partir dos dados reais de vibração e objetivam a determinação do comportamento dinâmico do componente em estudo. À sequência são apresentadas algumas metodologias descritas na literatura.

#### 3.1 Análise Modal Experimental

A Análise Modal Experimental, do inglês *Experimental Modal Analysis* (EMA), é utilizada para a determinação dos parâmetros modais nos casos em que o rotor da turbina não se encontra em operação. Segundo Dehkharghani et al. (2018), isto ocorre por conta da complexidade da realização deste tipo de experimento em domínios rotativos, especialmente em se tratando de protótipos de turbinas hidráulicas, uma vez que os sensores devem ser instalados em locais apropriados e suportar elevadas pressões e tensões. A transmissão dos dados para uma unidade estacionária é outro desafio.

Ainda de acordo com Dehkharghani et al. (2018), existem três técnicas de excitação disponíveis à EMA, sendo elas o martelo de impacto, velas de ignição e sensores piezoelétricos, sendo os dois primeiros os mais adequados às estruturas estacionárias.

Nesta linha Rodriguez et al. (2006) realizaram um ensaio de impactação com um martelo modal em um rotor de turbina suspenso no ar e posteriormente imerso em um tanque de água. A análise dos sinais foi feita a partir da Função de Resposta em Frequência (*Frequency Response Function* – FRF) para permitir a identificação de suas frequências naturais. Considerando o rotor no ar, os autores encontraram os modos de vibração cujas bandas descrevem um deslocamento senoidal na

direção radial do eixo e caracterizam os diâmetros nodais 2ND, 3ND e 4ND. Outros modos apresentaram movimentos particulares mesmo sem apresentar a banda deformada, sendo estes torcionais, flexionais e axiais. Devido à adição de massa de água houve mudança dos modos, sendo o modo torcional 2ND no ar deslocado para 4ND na água, por exemplo. As frequências naturais, por sua vez, diminuíram com a adição de massa, embora a relação não seja linear, enquanto o fator de amortecimento aumentou com o incremento da massa adicionada. Além disso foram observadas as influências da distância do rotor à superfície e à parede do tanque. O valor adimensional encontrado permitiu a conversão das frequências naturais do ar para a água e comprovou os menores valores deste parâmetro modal considerando o efeito de adição de massa.

Em Egusquiza et al. (2017) foram analisadas as excitações e as frequências naturais em uma turbina Pelton com vistas à detecção prematura de problemas de fadiga, no qual a falha ocorreu principalmente pelo fenômeno de ressonância devido à proximidade da frequência de excitação com a frequência natural da máquina. As lâminas da turbina Pelton foram impactadas em diferentes pontos com o uso do martelo, sendo analisados os sinais no domínio do tempo e da frequência, determinando os parâmetros modais. Os resultados das frequências naturais experimentais foram comparados com a simulação numérica, comprovando a eficácia da metodologia aplicada. A partir de simulações numéricas e da análise experimental da turbina em operação, comprovou-se que a frequência de operação da máquina estava próxima da frequência natural, o que desencadeava os problemas de fadiga no sistema.

Zhang et al. (2019) empregam a mesma metodologia em uma turbina Kaplan para observar as falhas incomuns em um contexto de Monitoramento da Saúde Estrutural (*Structure Health Monitoring – SHM*) da máquina em análise. Durante a realização da EMA com martelo de impactação foram identificados cinco modos e suas respectivas frequências naturais, as quais apresentaram resultados similares às frequências observadas na etapa de simulação numérica. Os autores então concluíram que a presença de arranhões na parede da câmara se dava por conta do contato entre a lâmina danificada e a própria parede.

Em Chen et al. (2022) o ensaio de impactação foi realizado com o uso de um vibrômetro à laser sem contato, pois o volume e a massa de um acelerômetro eram elevados quando comparado à lâmina do modelo de 3 pás analisado. Os amortecimentos mecânico e de radiação acústica foram determinados a partir de medidas de deformação das pás, enquanto o amortecimento hidrodinâmico foi calculado a partir da diferença entre o amortecimento total e a soma dos amortecimentos medidos. Os modos de vibração e as frequências naturais no ar foram maiores que aqueles determinados após a adição de massa.

Já em Roir et al. (2021) a aplicação de EMA foi feita tanto com o uso de um *shaker* localizado no disco da turbina quanto por meio de ensaios de impacto no eixo. Neste caso também foram

utilizados 5 acelerômetros localizados ao longo do comprimento do eixo e 1 único localizado no rotor do disco. Para a análise das vibrações relativas do eixo foram analisados 4 pontos, com 5 impactações em cada região considerando o sistema no ar. O ensaio com excitação a partir do *shaker* foi feito considerando a transposição do ar para a água. Para a análise das frequências naturais no ar foi realizado um ensaio de impactação no centro do rotor, com o acelerômetro posicionado em uma lâmina específica. Não houve mudanças significativas dos modos de vibrar do ar para a água. Os modos encontrados foram de torsão e flexão, e os resultados considerando as análises experimentais e numéricas foram compatíveis.

Como relatado nos trabalhos observados, a aplicação de EMA pode ser utilizada em qualquer tipo de turbina hidráulica, desde que conhecidas as entradas do sistema. Para solucionar esta questão, e depender somente das saídas para a determinação dos parâmetros modais, é utilizado o princípio da OMA, que analisa o sistema dinâmico somente em operação, sem necessitar de uma excitação externa para a obtenção dos resultados.

### 3.2 Análise Modal Operacional

Zini, Betti e Bartolli (2022) citam que o método OMA, na maioria das vezes, emprega a Identificação Estocástica de Subespaço, do inglês *Stochastic Subspace Identification* (SSI), que oferece uma técnica paramétrica adequada à implementação de programas computacionais. Ainda de acordo com os autores, o método SSI se baseia em um modelo de representação espaço-estocástica em sua formulação discreta, assumindo como entrada um ruído branco.

Nesta linha foi produzido o trabalho de Gagnon et al. (2021), que utilizou a OMA combinada com Análise Modal Baseada em Ordem (*Order Based Modal Analysis – OBMA*) para análise das frequências naturais e dos coeficientes de amortecimento empregando o Método da Decomposição da Frequência (*Frequency Domain Decomposition – FDD*). Dentre as contribuições os autores destacaram a impossibilidade da comparação do amortecimento em condições normais de operação com os coeficientes de amortecimento estimados a partir de análises experimentais com a presença de fenômenos hidráulicos. A partir da OBMA foram detectadas as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento em 7 diferentes modos, avaliando a máquina em condições de aceleração e desaceleração durante a operação. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com as simulações numéricas, embora sejam necessários mais estudos para o entendimento do significado físico dos valores obtidos.

Em Dollon et al. (2019) foi investigada a possibilidade de detecção de parâmetros modais em turbinas hidráulicas em regimes transientes com foco nas regiões de ressonância provenientes da relação entre a estrutura e as variações de frequência das pulsações de pressão. Foi utilizado o método de *Order Tracking* para a filtragem do sinal com a extração do harmônico específico

proveniente da variação de frequência, além da Análise de Mudança de Fase para detecção de ressonâncias com maior taxa de confiabilidade. Nos resultados foram demonstrados os modos harmônicos, os valores da Relação Sinal Ruído (*Signal-to Noise Ratio* – SNR), além dos parâmetros modais, como as frequências naturais e os coeficientes de amortecimento. Entre os métodos para a largura de banda, foram considerados o Critério de Garantia Modal (*Modal Assurance Criterion* – MAC) e o SENS para análises sensitivas. Por conta do espectro de valor singular estar atrelado ao ruído, o MAC acabou não sendo possível de ser utilizado pois selecionou banda estreita com pouco ruído. A partir da análise sensitiva foram determinados os parâmetros modais em função da largura de banda. Foram revelados cinco modos e uma banda multimodo. Entre os 4 modos bem separados, 3 foram excitados por um harmônico e identificados, sendo o primeiro modo de torção. A OBMA mostrou-se como uma metodologia aplicável para a determinação dos parâmetros modais combinando as técnicas mencionadas, sendo necessários avanços para melhor precisão e quantificação do processamento de sinais.

Dollon et al. (2021) aplicaram uma metodologia semelhante, tendo investigado as ressonâncias devido à interação entre os modos estruturais com os harmônicos da velocidade de rotação. Os parâmetros modais foram detectados em regimes assíncronos utilizando OBMA para o tratamento das medições realizadas com a máquina em operação.

#### 4 Simulação Numérica

As simulações numéricas em turbinas hidráulicas são aplicadas para fins comparativos e de complementação às análises experimental e operacional. Entre os métodos conhecidos estão o Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method* – FEM) e a Análise Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD).

##### 4.1 Método dos Elementos Finitos

No trabalho Valentín et al. (2014) foi desenvolvido um modelo de disco submerso que prevê a variação de posição ao longo de seu eixo. Foram feitas simulações numéricas utilizando FEM com o componente rotativo no ar e na água para análise das frequências naturais e sua variação ao longo da posição. Considerando o disco no ar, foram plotadas as FRF considerando a variação da posição do disco ao longo do comprimento do eixo e a plotagem das diferentes posições do disco com relação à frequência, comprovando uma relação de linearidade. Com o disco submerso em água, a relação entre a posição e a frequência foi exponencial e as razões entre as frequências no ar e na água, além do fator de adição de massa, apresentaram comportamento exponencial em função das variações da posição e da folga radial do disco. A folga radial também influenciou radialmente as frequências em detrimento da razão entre a frequência no ar e na água de maneira crescente, enquanto para o efeito de adição de massa a influência da folga radial contribuiu para a formação

de uma curva exponencial decrescente. A partir das simulações numéricas em comparação com as análises experimentais foi demonstrada a influência da folga radial e da posição do disco para as frequências naturais, e sua viabilidade para o estudo de estruturas submersas.

Em Liang et al. (2007) os resultados numéricos e experimentais mostraram concordância nos 6 modos, além de serem determinadas as razões de massa adicionada, de redução de frequência e o fator adimensional de adição de massa. Os parâmetros calculados tanto pelas simulações numéricas quanto experimentalmente não apresentaram linearidade ao longo dos modos. Foram analisados o comportamento dos modos variando-se os diâmetros nodais de 0 a 5, caracterizando o comportamento dinâmico das lâminas dos rotores. Para a descrição dos modos de maneira precisa foram analisados o número de diâmetros nodais na banda e as linhas nodais nas lâminas, embora os modos tenham apresentado pequenas diferenças no ar e na água, quando comparadas à mudança das frequências. O método mostrou-se eficaz, podendo ser aplicado para qualquer outra turbina hidráulica.

Em Lais et al. (2016) foram comparadas as frequências naturais no ar e na água em diferentes modos variando os diâmetros nodais. A ausência do amortecimento hidrodinâmico da turbina foi considerada nas simulações numéricas utilizando a FEM, resultando em maiores valores de frequências naturais. Porém, não foram investigadas certas influências no comportamento dinâmico, como os selos e o labirinto. Foram determinados os espectros em frequência considerando o fator de amortecimento hidrodinâmico, possibilitando a determinação das frequências naturais graficamente, além dos modos normais do sistema. Os estudos ainda comprovaram que a Razão de Redução de Frequência (*Frequency Reduction Ratio – FRR*) é fortemente influenciada pela geometria da lâmina, independentemente da geometria da coroa e da escala completa do material por inteiro. Os valores encontrados dos parâmetros modais e da FRR foram equivalentes tanto pela análise experimental quanto numérica.

#### 4.2 Análise Fluidodinâmica Computacional

As simulações numéricas utilizando CFD-FSI são realizadas visando a estimativa dos parâmetros modais no ar e na água de uma estrutura simplificada.

Em Zhang e Chen (2022) foi utilizado o software *Ansys Workbench* para análise da influência da adição de massa na estrutura. Neste caso, o amortecimento e a viscosidade dinâmica foram negligenciados devido a mínima influência neste tipo de estrutura. Os modos de vibração foram considerados em detrimento dos diâmetros nodais de 0ND a 4ND, apresentando diferentes comportamentos dinâmicos tanto no ar quanto na água. Em todos os modos o maior deslocamento encontrado foi nas lâminas, sendo que em 0ND, 1ND e 2ND os deslocamentos normalizados foram maiores quando comparados aos outros modos. Ainda se comprovou uma relação linear da



densidade do disco, sendo ela diretamente proporcional ao deslocamento. Os resultados identificaram mudanças nas formas modais em diferentes posições do disco durante a transposição do meio, do ar para a água, comprovando a eficácia da metodologia em diferentes componentes.

Monette et al. (2014) aplicaram a CFD considerando um sistema simplificado de 1 Grau de Liberdade (DOF – *Degree of Freedom*) e o princípio de CFD modal, sendo ambos os métodos alternativos para a determinação do comportamento dinâmico de lâminas dos rotores e do cálculo do amortecimento hidrodinâmico. Pelo método de 1 DOF foi feita a representação do Diagrama de Corpo Livre, além das análises de deslocamento no sistema considerando as simulações CFD. Aplicando o CFD modal foi determinada a relação entre o tempo e deslocamento, e o trabalho modal, sendo os modos independentes e ortogonais entre si. Comparando os resultados de ambas as metodologias aplicadas, em 17 m/s de aumento de velocidade o CFD modal e o sistema de 1 DOF apresentaram resultados diferentes, sem ficar muito claro o motivo desta diferença. A taxa de amortecimento não apresentou resultados claros, pois com o aumento dos amortecimentos, menos oscilações devem ocorrer, o que reduz a precisão do resultado em virtude do fator de amortecimento.

## 5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma breve revisão dos trabalhos voltados às metodologias aplicadas para a determinação dos parâmetros modais de rotores submersos de turbinas hidráulicas, de maneira a refletir a combinação das técnicas experimentais e numéricas.

As análises experimentais foram subdivididas em EMA e OMA, tendo a primeira se mostrado adequada para a determinação dos parâmetros modais com a máquina parada. A última, por sua vez, é indicada para a detecção de parâmetros modais em operação.

As simulações numéricas de FEM e CFD-FSI foram discutidas brevemente, sendo abordados os critérios de entrada a serem considerados.

A análise dinâmica de rotores apresenta etapas críticas a serem realizadas, tanto no âmbito teórico quanto prático. A metodologia pode ser aplicada para a detecção de fenômenos, falhas e defeitos, contribuindo para a determinação do tipo de manutenção adequada ao monitoramento da saúde estrutural de sistemas dinâmicos de pequeno, médio e grande porte.

## Agradecimentos

À UNIOESTE pela possibilidade de desenvolver este artigo.

## Divulgação

Não houve conflito de interesses neste trabalho entre os autores.



## Referências.

- (1) Dehkharghani AS; Aidanpaa JO; Engstrom F; Cervantes MJ. A Review of Available Methods for the Assessment of Fluid Added Mass, Damping, and Stiffness With an Emphasis on Hydraulic Turbines. **ASME**, v. 70, sep. 2018.
- (2) Trivedi C. A review on fluid structure interaction in hydraulic turbines: A focus on hydrodynamic damping. **Engineering Failure Analysis**, v. 77, p. 1-22, mar. 2017.
- (3) Rodriguez CG; Egusquiza E; Escaler X; Liang QW; Avellan F. Experimental investigation of added mass effects on a Francis turbine runner in still water. **Journal of Fluids and Structures**, v. 22, p. 699-712, jul. 2006.
- (4) Egusquiza M; Egusquiza E; Valentin D; Valero C; Presas A. Failure investigation of a Pelton turbine runner. **Engineering Failure Analysis**, v. 81, p. 234-244, nov. 2017.
- (5) Zhang M; Valentín D; Valero C; Egusquiza M; Egusquiza E. Failure investigation of a Kaplan turbine blade. **Engineering Failure Analysis**, v. 97, p. 690-700, mar. 2019.
- (6) Chen H; Tong X; Chen Y; He J. Theoretical and experimental studies on the hydrodynamic rotating propeller blades. **Internacional Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, no prelo, mar. 2022.
- (7) Roig R; Torre ODL; Jou E; Mulu B; Escaler X. Experimental and numerical modal analysis of a reduced scale Kaplan turbine model. **Proceedings of the 3rd IAHR-Asia Symposium on Hydraulic Machinery and Systems**; 2021 Nov 22-23; Kathmandu, Nepal.
- (8) Zini Giacomo; Betti Michele; Bartoli Gianni. A pilot project for the long-term structural health monitoring of historic city gates. **Journal Of Civil Structural Health Monitoring**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 537-556, 23 mar. 2022. Springer Science and Business Media.
- (9) Gagnon M; Dollon Q; Nicolle J; Morissette J-F. Operational Modal Analysis of Francis Turbine Runner Blades Using Transient Measurements. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.]; v. 774; n. 1; p. 012082; 2021 Jun 1; IOP Publishing.
- (10) Dollon Q; Tahan A; Antoni J; Gagnon M; Monette C. Dynamic Characterization of Hydroelectric Turbine with Transient Data Records Using OBMA and Phase-Shift Analysis. **SURVISHNO**; n. 08 – 10; p. 343- 355; jul. 2019.
- (11) Dollon Q; Antoni J; Tahan A; Gagnon M; Monette C. Operational Modal Analysis of hydroelectric turbines using an order based likelihood approach. **Renewable Energy**; v. 165; p. 799 – 811; mar. 2021.
- (12) Valentín D; Presas A; Egusquiza E; Valero C. Influence of the added mass effect and boundary conditions on the dynamic response of submerged and confined structures. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**; v. 22; n. 3; p. 032042; 1 mar. 2014. IOP Publishing.
- (13) Liang QW; Rodríguez CG; Eguquiza E; Escaler X; Farhat M; Avellan F. Numerical simulation of fluid added mass effect on a francis turbine runner. **Computers & Fluids**, v. 36, n. 6, p. 1106-1118, jul. 2007.
- (14) Lais S; Liang Q; Henggeler U; Weiss T; Escaler X; Egusquiza E; et al. Dynamic Analysis of Francis Runners - Experiment and Numerical Simulation. **International Journal Of Fluid**



**Machinery And Systems**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 303-314, dez. 2009. Korean Fluid Machinery Association. (16) 10.1016 (2019).

(15) Zhang M; Chen Q-G. Numerical investigation of the added mass effect of submerged blade disk structures: from simplified models to francis turbine runners. **Alexandria Engineering Journal**, [S.L.], v. 61, n. 4, p. 3013-3020, abr. 2022.

(16) Monette C; Nennemann B; Seeley C; Coutu A; Marmont H. Hydro-dynamic damping theory in flowing water. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 032044, 1 mar. 2014. IOP Publishing.