

ESTUDO DA DINÂMICA DE TURBINAS HIDRÁULICAS MARÉ-MOTRIZES DO TIPO DARRIEUS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Manoel José dos Santos Sena

André Luiz Amarante Mesquita

GTDEM – Grupo de Turbomáquinas, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro tecnológico, Universidade Federal do Pará, 66.075-900, Belém, PA, Brasil. E-mail: gtdem@ufpa.br

***Resumo.** O objetivo deste trabalho é descrever a implementação um tipo de modelagem elementos finitos para o estudo da resposta dinâmica de rotores de turbinas hidráulicas maré-motrizas do tipo Darrieus. Um acoplamento fluido-estrutura será utilizado para colocar em evidência alguns aspectos da interação rotor-água. Todos os cálculos serão realizados em relação aos sistema de referência que gira com a estrutura. A validade da forma de implementação usando a linguagem de programação paramétrica do programa ANSYS é discutida e alguns resultados conseguidos para a configuração livre-livre do sistema apresentados.*

***Palavras-chave:** Turbinas hidráulicas, Darrieus, Elementos finitos, Dinâmica*

1. INTRODUÇÃO

O projeto de turbinas hidráulicas para centrais hidrelétricas de pequena potência é um tópico de caráter estratégico para o Brasil e para a Região Amazônica em particular, devido à grande disponibilidade de recursos hídricos. Estes recursos apresentam particularidades em relação à outras regiões do país: pequenos desníveis nos leitos e grande amplitude de variação das vazões verificadas durante o ano. Por outro lado, tem-se ainda a disponibilidade da utilização da maré em toda a região costeira do Pará e Amapá e na região ribeirinha do estuário do rio Amazonas.

O Grupo de Turbomáquinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (GT-DEM) vem realizando ao longo dos últimos anos um esforço no sentido de desenvolver metodologias de projeto de máquinas de baixa queda e de baixo custo, sem recorrer a métodos de controle sofisticados, através de um projeto hidráulico cuidadosamente estudado. Critérios de projeto têm sido apresentados (Amarante Mesquita *et al*, 1999) e algumas já estão em desenvolvimento.

Particularmente em relação a utilização da maré, uma pequena turbina-piloto (um rotor Darrieus de quatro pás) para usinas maré-motrizes foi instalada na Ilha do Combú, às proximidades Belém. Foi construída uma barragem com um canal para estreitamento de um “furo” (pequeno braço de rio) e diversos ensaios foram realizados (Guerra *et al.*, 1997). Alguns problemas no que se refere às amplitudes de vibração excessivas em regime foram detectados e levaram à diminuição considerável da vida útil prevista para o rotor Darrieus empregado. Devidos à esses problemas tornou-se necessário a realização de um estudo visando caracterizar o comportamento dinâmico-estrutural deste tipo de rotor quando submetido à carregamentos cíclicos causados por perturbações periódicas no escoamento causadas.

Assim, uma etapa importante para se alcançar esse objetivo é o desenvolvimento de modelos visando a determinação das características modais do rotor imerso. Este trabalho apresenta o procedimento de modelagem e as ferramentas numéricas que se planeja utilizar para alcançar este objetivo.

Na análise desse mesmo tipo de problema em uma turbina Francis, Netch & Giacometti (1982) mostraram que flutuações de pressão causadas por este tipo de excitação podem originar vibrações indesejáveis em partes fixas da máquina. Se o rotor da turbina estiver vibrando excessivamente, contribuirá para a amplificação das flutuações de pressão na frequência na qual estiver vibrando. Faz-se portanto necessário o estudo das características modais de um rotor imerso em um meio fluido. O GTDEM tem experiência neste tipo de cálculo utilizando modelos elementos finitos com abordagem pressão para o fluido e deslocamento para a estrutura (Sena *et al.*, 1999). Os limites desta abordagem são encontrados quando são tratados os casos de máquinas de alta velocidade de rotação com grandes forças de interação nos selos hidráulicos.

Os problemas de interação dos elementos do rotor com outras partes das máquinas tem sido bastante estudado nos últimos anos, devido principalmente ao desenvolvimento de máquinas Francis de alta queda (Tanaka *et al.*, 1992). Entretanto, quando se objetiva projetar máquinas para trabalhar com diversos regimes de funcionamento, estudos deste tipo se tornam ainda mais importantes, pois caso alguma frequência de funcionamento se aproxime da frequência associada a um modo passível de ser excitado, amplitudes de vibração proibitivas podem ser alcançadas.

Apesar do avanço demonstrado no campo do cálculo numérico do escoamento nos rotores de turbinas e bombas hidráulicas, ainda é difícil hoje em dia utilizar estes procedimentos, por causa principalmente do custo financeiro e do tempo necessário para análises de escoamento sofisticadas. Além dos mais, em situações apresentando alto grau de turbulência e descolamento, por exemplo, os modelos disponíveis tendem a ter sua eficácia diminuída. Apesar disto, modelos sólidos que suportem uma análise confiável pelo menos no que se refere às informações de natureza freqüencial podem ser bastante úteis para se verificar possibilidades de ressonância. O carregamento usado pode ser o resultado de um cálculo transiente, medições de escoamento ou estimativas advindas de cálculos em regime permanente.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO

O método de elementos finitos foi utilizado na discretização tanto da estrutura quanto do fluido. A linguagem de programação paramétrica do programa ANSYS foi usada na intenção de gerar um modelo totalmente parametrizado, de tal forma que o usuário não tenha que interferir através do ambiente de desenvolvimento integrado nas etapas de geração do modelo (posição de vértices dos volumes, construção de linhas e volumes, definição de coordenadas e conectividades nodais).

O acoplamento fluido-estrutura é baseado no seguinte sistema de equações :

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [M_I] & [M_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_n\} \\ \{\ddot{P}_n\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [C_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}_n\} \\ \{\dot{P}_n\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & -[R_I] \\ [0] & [K_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_n\} \\ \{P_n\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_e\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

onde [M] é a matriz de massa global; [M_I] é a matriz de massa de interface global; [M_f] é a matriz de massa do fluido global; [C_f] é a matriz de amortecimento global do fluido; [K_f] é a matriz de rigidez global do fluido; [R_I] é a matriz de interface global; [K] é a matriz de rigidez global; {F_e} - é o vetor forças externas global; {U_n} é o vetor deslocamentos global; {P_n} é o vetor pressão global

Os efeitos centrífugos foram considerados através da inclusão de matrizes centrípetas e de pré-tensão (Bathe, 1996). Entretanto, devido às baixas velocidades de rotação deste tipo de máquina, os efeitos da rotação podem ser desprezados no intuito de simplificar a análise e diminuir os recursos computacionais necessários.

Em um problema de cálculo de parâmetros modais considera-se o vetor à direita da Eq. (1) como sendo nulo, assim como o amortecimento desprezível. Na realidade, desde que não se tenha grande grau de turbulência e descolamento, o escoamento influencia muito pouco no valor das frequências naturais (Dal-Ferro, 1994).

A validade deste tipo de abordagem para o problema em questão já foi discutida em outros artigos, como por exemplo Sena *et al* (1999). De forma geral, os valores de frequência natural são diminuídos pelo efeito do campo de pressões gerado no fluido.

Neste estudo preliminar, foi considerado que o material da turbina é o aço. As condições de contorno em deslocamento foram livre-livre e as condições de contorno naturais em pressão na face exterior do domínio fluido.

O tipo de elemento usado para a discretização da parte sólida foi o SOLID45 (oito nós) e da parte líquida, o FLUID30 (também com oito nós). A configuração de malhagem escolhida para efetuar os cálculos foi a estruturada, pois os elementos utilizados apresentam erro quando usados na forma tetraédrica, exigida para o caso de uma malha não estruturada. A figura 1 mostra os nós da malhagem, assim como os elementos gerados (5950 nós e 4752 elementos). O domínio fluido construído foi um domínio cilíndrico em torno do rotor. Quando a geometria do sistema estiver definida, o canal onde a turbina está instalada será modelado, sabendo-se que os efeitos do confinamento agem no sentido mudar ainda mais os valores de frequência natural (Sena, 1999).

Os procedimentos de consideração de simetria cíclica da estrutura, como por exemplo em Sena *et al* (1999) e Dal Ferro (1994), não foram adotados para a realização dos cálculos, pois foi verificado que devido ao pequeno número de setores (três), o tempo computacional necessário para resolver o problema utilizando as relações de dependência complexa oriundas da teoria da propagação de ondas em meios periódicos era maior do que com o modelo completo. No entanto, quando da necessidade de estudar frequências naturais mais altas, uma malha mais fina deverá ser usada e a aplicação de relações de dependência complexa volta a ter grande interesse.

Como o sistema (1) não é simétrico, métodos específicos devem ser usados para resolvê-lo. O programa ANSYS disponibiliza uma modificação do método de Lanczos para trabalhar com matrizes não-simétricas (Rajakumar & Rogers, 1992). Na realidade, as transformações de Lanczos são aplicadas ao autop problema generalizado e as matrizes resultantes têm seus autovalores e autovetores calculados pelo método QR (Bathe, 1996), com a ajuda de aritmética complexa.

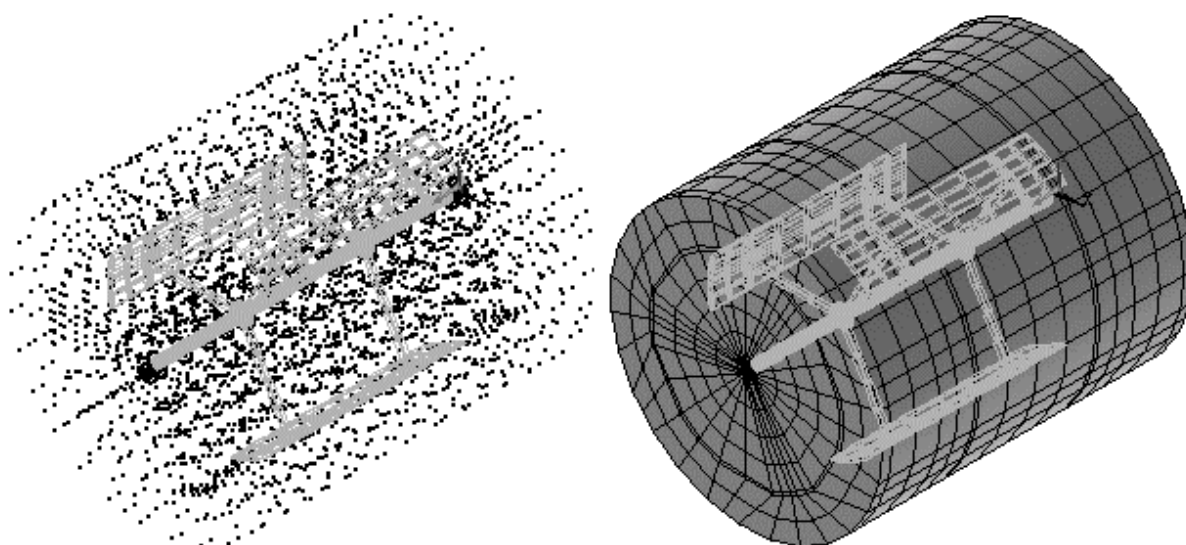


Figura 1 – Malha gerada contendo os domínios sólido e fluido.

3. RESULTADOS

A tabela 1 mostra o valor das primeiras freqüências naturais calculadas, no caso do rotor imerso em ar e em meio fluido, para os primeiros modos de vibração.

Tabela 1 – Comparação entre as freqüências naturais do rotor quando imerso em ar ou em água (Hz)

No.	Rotor imerso no ar	Rotor imerso na água	Mudança (%)
1	22,4	20,7	-7,6
2	29,8	29,7	-0,3
3	33,0	32,6	-1,2
4	53,8	49,6	-7,8
5	62,2	61,7	-0,8

Os modos de vibração em deslocamento e em pressão, para os primeiros cinco modos são mostrados nas figuras 2 a 4.

Analisando a tabela 1, pode-se concluir que alguns modos são muito mais influenciados pela presença do fluido do que outros. Como foi discutido em Sena (1999), a razão para este fato consiste na forma dos campos de pressão gerados pelo movimento da estrutura. No caso do primeiro modo, por exemplo (figura 1b), nota-se duas regiões onde um gradiente de pressão muito importante existe, os valores relativos de pressão nesta região também são grandes quando comparados à média (este fenômeno deve-se ao fato de que neste modo de vibração as pás efetuam movimento considerável na direção perpendicular às regiões de intradorso e extradorso). Logo, este carregamento tende a influenciar bastante o comportamento dinâmico.

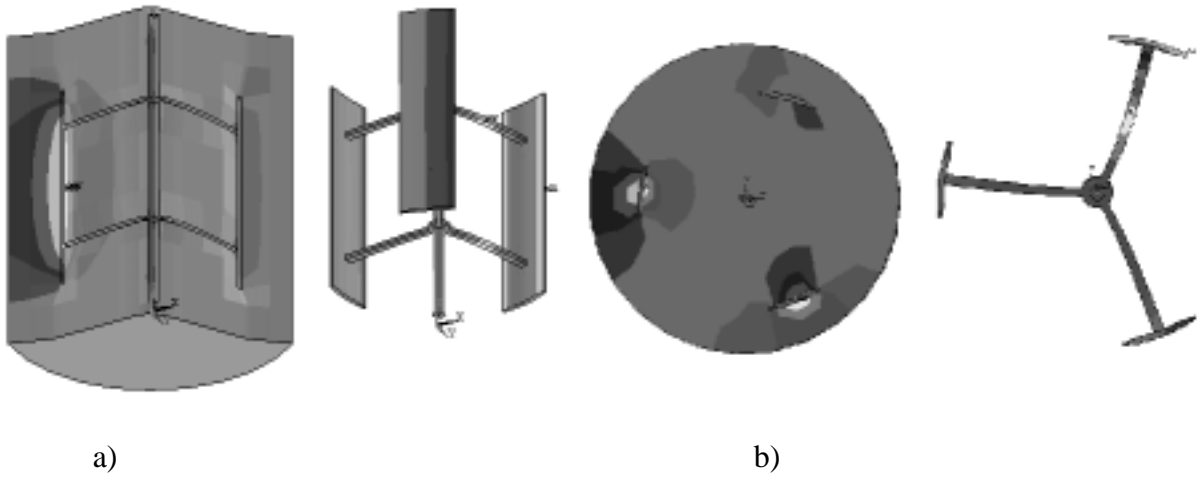


Figura 2 – Primeiro modo de vibração do rotor Darrieus imerso em água. (a) Campos de pressão e deslocamento em perspectiva; (b) Campos de pressão e deslocamento no plano xy

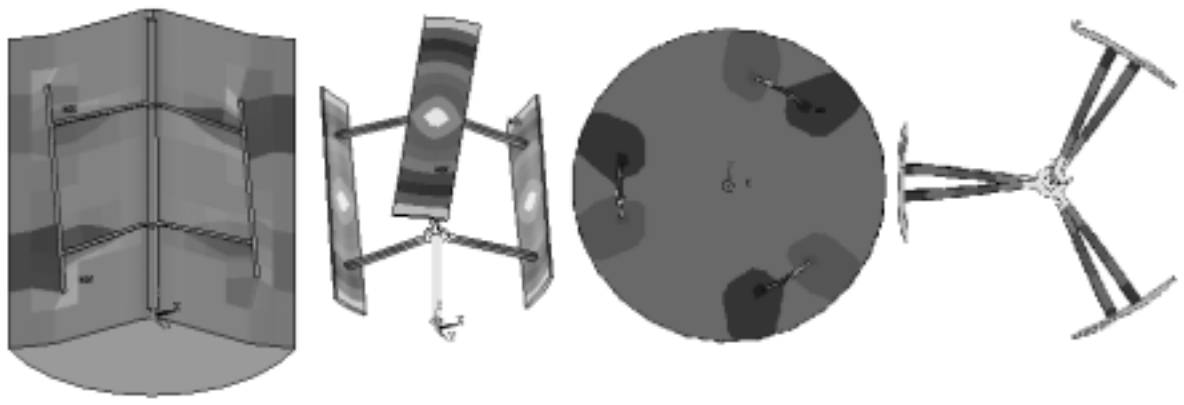


Figura 3 – Segundo modo de vibração do rotor Darrieus imerso em água. (a) Campos de pressão e deslocamento em perspectiva; (b) Campos de pressão e deslocamento no plano xy

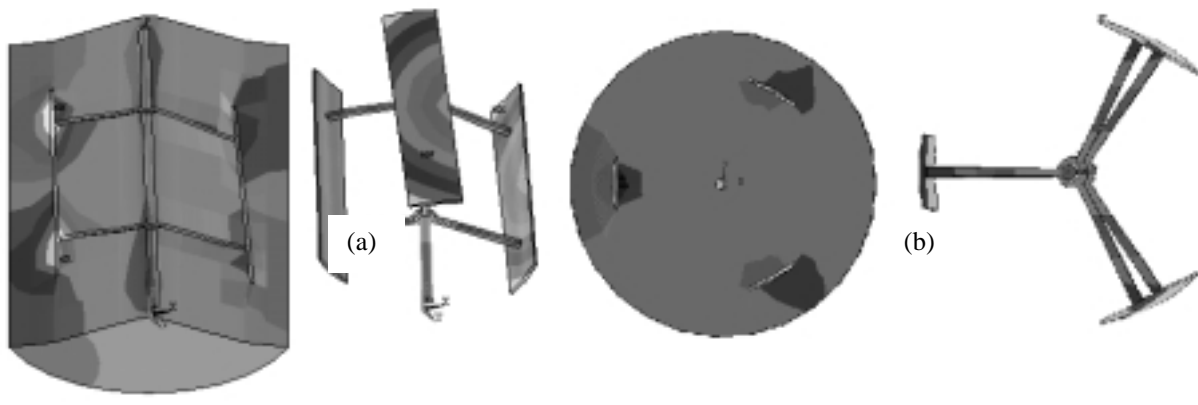


Figura 4 – Terceiro modo de vibração do rotor Darrieus imerso em água. (a) Campos de pressão e deslocamento em perspectiva; (b) Campos de pressão e deslocamento no plano xy

Já nos modos 2 e 3, o deslocamento das pás ocorre predominantemente na direção azimutal, notando-se então pressões relativas pequenas entre a superfície das pás e os limites do domínio fluido.

As condições de contorno para a instalação real em vista serão mancais colocados nas extremidades do eixo. Isto causará um aumento significativo dos valores de frequência natural. As frequências de excitação serão definidas pela rotação da máquina e pela forma do canal. No momento da definição da geometria final do sistema será útil realizar um procedimento de otimização da posição dos mancais e da forma do canal, visando afastar ao máximo as frequências naturais das frequências de excitação.

4. CONCLUSÕES E SEQUÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO

Um procedimento usando a linguagem de programação paramétrica do programa de elementos finitos ANSYS foi desenvolvido com o objetivo principal de aplicar estas técnicas no projeto de um rotor de turbina maré-motriz do tipo Darrieus. Os aspectos de interação fluido-estrutura e efeitos centrífugos foram considerados. As rotinas foram validadas individualmente em outros trabalhos e então aplicadas para o estudo do comportamento da turbina em questão.

O modelo fluido usa a equação da onda acústica para descrever o campo de pressões gerado pela vibração da estrutura. O escoamento não é considerado, pois existem evidências dadas por soluções analíticas e experimentais que mesmo escoamentos envolvendo velocidades da ordem de 100 m/s não afetam significativamente o valor numérico das frequências naturais (Caillot, 1983), desde que não haja um grau de turbulência elevado, nem descolamentos no escoamento.

Para condições de escoamento apresentando alto grau de turbulência ou descolamentos, a teoria usada neste trabalho não pode mais ser aplicada e métodos de acoplamento considerando o escoamento do fluido devem ser considerados. Neste caso, uma abordagem cada vez mais utilizada é usar soluções iterativas com modelos fluido e sólido acoplados através de condições de interface, mas com metodologias de tratamento e modelagem independente. Devido ao movimento da estrutura, o domínio fluido (ao menos nas regiões próximas da interface com o sólido) não suporta uma abordagem do tipo Euleriana e elementos utilizando formulação com derivadas em relação ao tempo usando a malha móvel como referencial são utilizados. Este procedimento é conhecido como abordagem arbitrária Euler-Lagrange (Nitikitpaiboon e Bathe, 1993; Nomura e Hughes, 1992).

No caso de turbinas de alta rotação, onde as forças de interação nos labirintos são muito grandes, o modelo usado neste trabalho precisa ser corrigido se os valores de rigidez equivalente nos labirintos forem da mesma ordem de grandeza dos valores de rigidez do rotor.

Ensaio experimentais são muito importantes para entender melhor os fenômenos que interferem no comportamento dinâmico das turbinas hidráulicas. No entanto, estes ensaios esbarram no alto custo de instalações e da instrumentação necessária. Albjanic et al (1994) desenvolveram martelos pneumáticos que permitem a excitação de um rotor Kaplan em funcionamento, de tal forma que o mesmo possa vibrar livremente. Esta técnica pode ser adaptada ao caso de rotores Darrieus e permitiria a verificação experimental do valor das frequências naturais em funcionamento deste tipo de turbina.

5. REFERÊNCIAS

Amarante Mesquita, A. L., Cruz, D. O. A., Serra, C. M. V. and Manzanares Filho, N., 1999, A Simplified Method for Axial-Flow Turbomachinery Design, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, vol. 21, n. 1, pp. 61-70.

- Albjanic, R., et al, 1994, Identification of Vital Hydrounit Components Dynamic Parameters in Water Environment, *17th IAHR Symposium*, China.
- Bathe, K.J., 1996, *Finite Element Procedures*, New Jersey : Prentice-Hall.
- Caillot, G., 1983, Contribution à la Recherche de Méthodes Analytiques pour l'Étude de l'Influencemdu Confinement sur la Vibration des Structures en Présence d'un Milieux Fluide. Thèse de Doctorat: Institut National Polytechnique de Grenoble, França.
- Dal-Ferro, C., 1994, Etude Dynamique des Structures à Symétrie Cyclique Immergées dans un Fluide Lourd. Application à une Roue de Pompe Centrifuge, Thèse, INSA Lyon, França.
- Guerra, D. R. S., Amarante Mesquita, A. L., and Anderson S. D., 1997, Development and Testing of Small Darrieus-Type Turbine for Tidal Current in the Mouth of the Amazon, XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru-SP.
- Jay, R.L., et al, 1984, Structural Response due to Blade Vane Interaction, *Transactions of the ASME*, vol. 106, january, p. 50-56.
- Kubota, Y. et al, 1983, Vibration of Rotating Disc Excited by Stationary Distributed Forces, *Trans. of Japan Society of Mech. Eng.*, vol.49, no.439-c, pp.307-313.
- Netch, H., Giacometti, A., 1992, Axial-Flow Induced Vibrations in Large High Head Machines, *Water Power and Dam Construction*, August, pp. 21-27.
- Nitikitpaiboon, C., Bathe, K.J., 1993, An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Velocity Potencial Formulation for Fluid-Structure Interaction, *Computers & Structures*, vol.47, no.4/5, pp.871-891.
- Nomura, T. Hughes, T.J.R., 1992, An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element for Interaction of Fluid and Rigid Body, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.32, pp. 1009-1026.
- Rajakumar, C., Rogers, C. R., 1992, The Lanczos Algorithm Applied to Unsymmetric Generalized Eigenvalue Problem, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.32, pp. 1009-1026.
- Sena, M.J.S., Reynaud, G. Kueny, J.L., 1999, Dynamic Behaviour Improvement of Francis Turbine Runners, *International Journal for Hydropower and Dam Construction*, January, pp.90-95.
- Sena, M.J.S., 1999, Etude du Comportement Dynamique des Roues de Turbines et Pompes Centrifuges pour la Conception Mécanique Optimisée : cas d'une Roue Francis. Thèse de Doctorat : Institut National Polytechnique de Grenoble, França.
- Tanaka, H., et al, 1992, Studies on Dynamic Stress of Runners for the Design of 760 m Head Pump-Turbines, *16th Symposium of the IAHR*, São Paulo : Brasil, pp. 239-248.
- Thomas, D.L., 1979, Dynamic of rotationally periodic structures, *Journal of Numerical Methods in Engineering*, vol.14, pp. 81-102.

Abstract. *The purpose of this work is describe the implementation of a finite element model for dynamic response analysis of Darrieus-type turbine runners. A fluid-structure coupling is be used to put in evidence some aspects of the rotor-water interaction. The rotating system fixed to the rotor will be used when writing the equations governing the system. A procedure using the ANSYS Parametric Design Language is discussed and some results obtained for the free-free configuration are shown.*

Keywords: *Hydraulic turbines, Darrieus, Finite Elements, Dynamics*