

ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO CFD DO ESCOAMENTO TRANSITÓRIO NO CIRCUITO DE ADUÇÃO COM CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – PCH

Antonio Braulio Neto, Jayme Pinto Ortiz

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Brasil.
E-mail: antonio.braulio@usp.br, jp Ortiz@usp.br

Introdução

No Brasil, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) são aproveitamentos hidrelétricos de potência instalada entre 3,0 MW e 30,0 MW, com área alagada máxima do reservatório de 13,0 km². Em geral, a escolha por tais empreendimentos deve-se à sua viabilidade ambiental e econômica, uma vez que existe legislação específica para sua outorga e licenciamento.

No desenvolvimento do projeto de centrais hidrelétricas o estudo dos transientes hidráulicos faz-se necessário para o correto dimensionamento das estruturas hidráulicas sujeitas às variações de pressão ou golpe de arfete, a fim de eliminar os riscos de acidentes operacionais que podem comprometer a geração de energia elétrica ou causar perdas de vidas humanas.

A instalação da estrutura denominada Chaminé de Equilíbrio na adução de uma PCH é uma alternativa economicamente viável para amortecer os efeitos do golpe de ariete, fenômeno causado pela rápida variação da velocidade média do escoamento no circuito adutor.

O dimensionamento de tal estrutura pode ser realizado segundo a norma técnica ABNT (1992), cujos critérios estão baseados na teoria analítica de escoamentos transitórios uni dimensional (1D), apresentada em Chaudhry (2014) e Wylie (1993).

Atualmente, a área da *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e os avanços na capacidade de processamento (*softwares* e *hardwares*) permitem a aplicação de modelos tridimensionais (3D) em conjunto com técnicas numéricas para resolver o sistema de equações que governam o escoamento de fluidos em regimes permanentes e transitórios, fornecendo os campos de pressão e velocidade para os instantes de interesse.

Em contrapartida, o estudo do escoamento na adução de PCH pode ser realizado por meio de tais *softwares* de CFD, no caso o Ansys CFX, que utiliza a técnica de volumes finitos para discretização do domínio fluido (ANSYS, 2013).

Este trabalho tem como objetivo comparar os resultados dos níveis de oscilação de massa na Chaminé de Equilíbrio fornecidos pelo emprego da norma técnica com aqueles fornecidos pela utilização do *software* Ansys CFX para o modelo tridimensional proposto da PCH, considerando o escoamento transitório com sobre pressões, ou golpe de arfete, causado pelo fechamento instantâneo de válvula.

Metodologia

O trabalho consiste na avaliação de estudo de caso tanto com a abordagem analítica, quanto com a abordagem numérica CFD, para descrever o comportamento do transitório hidráulico, representado pela oscilação de massa ou nível d'água na chaminé de equilíbrio, com o fechamento instantâneo ou abrupto da vazão efluente do circuito hidráulico.

A abordagem analítica representa a utilização das equações de conservação e da modelagem 1D (uni dimensional) com suas respectivas hipóteses simplificadoras para esse tipo de problema: oscilação de massa ou nível d'água em Chaminé de Equilíbrio (Chaudhry, 2014 e Wylie, 1993).

A abordagem numérica representa a utilização do pacote Ansys CFX R16.2 versão acadêmica para modelagem 3D (tri dimensional), com o emprego da técnica dos volumes finitos para resolver o escoamento do fluido tanto em regime permanente, quanto em regime transitório para o dado volume de controle (ANSYS, 2013).

O circuito hidráulico avaliado no estudo de caso consiste de uma adução única interligando o reservatório da usina hidrelétrica ao dispositivo de controle de vazão, podendo ser uma válvula ou distribuidor da turbina, conforme apresentado na Figura 1.

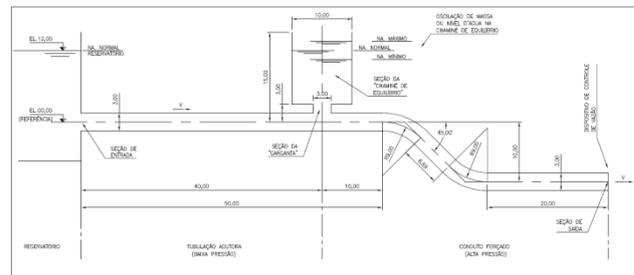


Figura 1.- Características Geométricas Principais e Nível d'Água do Reservatório do Circuito Hidráulico.

Essa geometria deriva do estudo de características médias de PCH's encontradas no Brasil, onde prevalecem empreendimentos de baixa queda. Adotou-se a potência instalada para o conjunto turbina-gerador aproximada de 3,5 MW com 22 m de queda bruta e uma tubulação de seção circular com diâmetro interno de 3,0 m ao longo de todo o seu comprimento.

Após a captação de água por uma entrada perpendicular ao reservatório, a tubulação adutora (baixa pressão) segue por um trecho horizontal de 40,0 m até encontrar o Tê de derivação que corresponde à "garganta" de entrada da Chaminé de Equilíbrio.

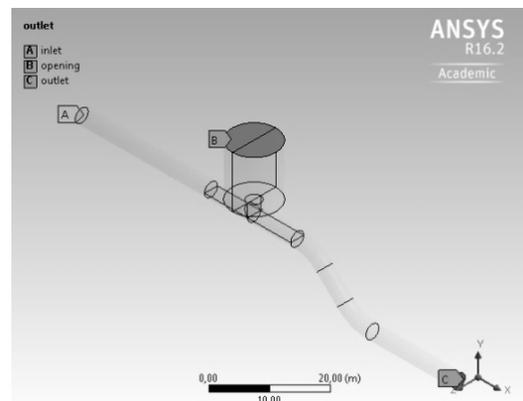


Figura 2.- Geometria utilizada na modelagem 3D do circuito hidráulico com indicação das seções de entrada de adução (A inlet), da abertura superior da Chaminé de Equilíbrio (B opening) e de saída do conduto (C outlet).

A Chaminé de Equilíbrio possui seção circular constante com diâmetro de 10,0 m e altura de 12,0 m acima do estrangulamento. Esse estrangulamento ou “garganta” está localizado na sua base e possui seção circular constante com diâmetro de 3,0 m e altura de 3,0 m, contabilizada a partir da linha de centro do trecho horizontal da tubulação adutora.

O circuito hidráulico segue com o início do conduto forçado (alta pressão), que é constituído por um trecho horizontal de 10,0 m de comprimento, uma curva vertical com ângulo de 45,0° e raio de 9,0 m, um trecho reto inclinado a 6,7 m de comprimento, uma segunda curva vertical com ângulo de 45,0° e raio de 9,0 m, seguida pelo trecho final horizontal de 20,0 m de comprimento e a seção de saída, local onde se encontra o dispositivo de controle de vazão.

O modelo 3D resultou na geometria apresentada na Figura 2, com destaque das seções de aplicação das condições de contorno. As demais superfícies da geometria em questão consistem em paredes, onde as condições de parede lisa e de não escorregamento do fluido foram empregadas.

A condição inicial adotada consiste no campo de velocidade e pressão do regime permanente para a vazão de 14,14 m³/s (ou velocidade média do escoamento no conduto de 2,0 m/s).

Para o instante de tempo $t \geq 0$ s, a velocidade na saída é nula, representando o fechamento instantâneo ou abrupto do dispositivo de controle da adução.

Os efeitos de oscilação de massa na Chaminé de Equilíbrio foram avaliados durante 60 s após o instante de fechamento da válvula.

Resultados e discussões

O nível d'água na chaminé de equilíbrio foi avaliado por meio de superfície *IsoSurface* construída a partir dos elementos da malha que possuem o mesmo valor para a variável fração volumétrica de água.

Para uma dada superfície *IsoSurface* relaciona-se o nível d'água com o valor médio da elevação (coordenada Y) de cada elemento de malha que constitui essa superfície, ponderado pela respectiva área.

A elevação (coordenada Y) de cada elemento refere-se à distância medida em metros desse elemento à linha de centro da tubulação no trecho à montante da Chaminé de Equilíbrio.

Os resultados a seguir (Figuras 3 e 4) apresentam as *IsoSurfaces* para os valores de fração volumétrica de água de 0,1, 0,5 e 0,9. Este intervalo foi escolhido para que os níveis d'água resultantes possam ser comparados com os valores obtidos pelos resultados da oscilação de massa na chaminé equilíbrio a partir de modelos 1D analíticos e numéricos.

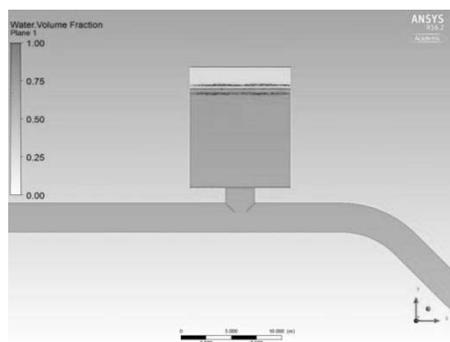


Figura 3.- Fração volumétrica da água (%) no plano médio do circuito hidráulico com indicação das superfícies *IsoSurfaces* com valores de fração volumétrica da água de 0,1, 0,5 e 0,9, respectivamente de cima para baixo, na condição de escoamento permanente no instante inicial.

O gráfico da Figura 4 indica que o regime transitório decorrente do fechamento abrupto é do tipo periódico amortecido, com o primeiro máximo sendo alcançado no instante $t_1 = 13,5$ s seguido pelo primeiro mínimo no instante $t_2 = 37,75$ s, resultando no período de oscilação de $T = 48,5$ s.

Esse valor de período de oscilação está próximo ao encontrado no pelos procedimentos analíticos de cálculo, $T = 42$ s.

Para a curva de fração volumétrica de água = 0,5 (curva central), o primeiro máximo alcança a elevação $Y = 14,0$ m, enquanto que o primeiro mínimo encontra-se na elevação $Y = 13,2$ m, resultando numa diferença aproximada de 0,80 m. Os demais casos de fração volumétrica de água apresentam valores próximos para essa diferença de nível.

Esse valor de amplitude de oscilação entre o primeiro máximo e o primeiro mínimo está abaixo de 1,84 m, valor encontrado para essa diferença com a utilização dos procedimentos analíticos de cálculo (ABNT, 1992).

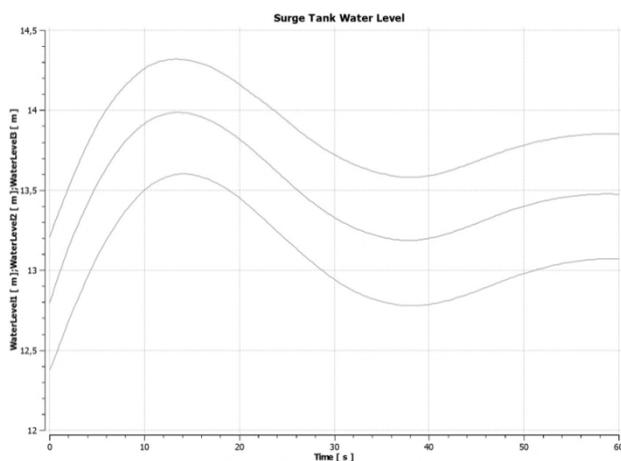


Figura 4.- Níveis d'Água na Chaminé (m) das superfícies *IsoSurfaces* com valores de fração volumétrica da água de 0,1, 0,5 e 0,9, respectivamente de cima para baixo, na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo de 60s.

Conclusão

O modelo 3D proposto para análise CFD do escoamento transitório em Chaminé de Equilíbrio de PCH mostrou-se viável e compatível com a teoria unidimensional para resolução do problema de fechamento abrupto de válvula. Fato este indicado pela forma de onda esperada para o nível d'água na chaminé: periódica e amortecida.

O modelo CFD deve ser calibrado com valores adequados de coeficiente de rugosidade das paredes para melhor representar os possíveis estudos de caso, dado este ponto chave na teoria unidimensional, que diz respeito aos coeficientes de perda de carga localizados e distribuídos adotados para o circuito hidráulico.

Referencias bibliográficas

ABNT (1992). “Dimensionamento hidráulico de chaminés de equilíbrio para pequenas centrais hidrelétricas (PCH)”. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12596:1992, 5 p. 1992.

ANSYS (2013), ANSYS CFX - Solver Theory Guide. Release 15. ANSYS, Inc. U.S.A., 2013.

Chaudhry, M. H. (2014). *Applied hydraulics transients*. 3ed. 583 p. Springer-Verlag. New York, 2014.

Wylie, E. B., Streeter, V. L. (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice-Hall, 1993.