

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO EM APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS. O CASO DOS REFORÇOS DE POTÊNCIA DE VENDA NOVA

Hydrodynamic Simulation of Exploration Conditions in Hydroelectric Developments. Venda Nova Power Reinforcements Case

RUI RIBEIRO ⁽¹⁾, RODRIGO MAIA ⁽²⁾ e PEDRO PINTO ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ruiribeiro@live.com

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

⁽³⁾ Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, EDP-Eletricidade de Portugal,
R. Ofélia Diogo da Costa 115, 4149-022 Porto, pedro.pinto@edp.pt

Resumo

Após a fase de projeto do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III, foi equacionada a hipótese de funcionamento de uma das centrais em turbinamento e da outra em bombagem, em simultâneo, de modo a majorar a flexibilização da exploração dos aproveitamentos. Deste modo, o trabalho visou o estudo hidrodinâmico de operações de turbinamento e bombagem no canal de restituição dos reforços de potência Venda Nova II e III, através da simulação de cenários de exploração dos dois aproveitamentos empregando programas de cálculo que utilizam modelos numéricos bidimensionais e que resolvem as equações definidoras do escoamento através de métodos de volumes finitos: o GUAD 2D e o IBER (que permite a simulação de transporte de sedimentos).

Os resultados obtidos não revelaram limitações à exploração dos aproveitamentos. O estudo permitiu concluir a viabilidade da aplicação de diferentes modos de funcionamento, inovadores, para o caso de estudo.

Palavras-chave: Modelação hidrodinâmica 2D, GUAD 2D, IBER, reforços de potência de Venda Nova, operações simultâneas de bombagem e turbinamento.

Abstract

After the project of Venda Nova III hydroelectric power plant, it was equated the hypothesis of pumping operations in one power plant and turbocharging operations in the other one, simultaneously, to increase the flexibility of exploration of the power plants. This report aims the hydrodynamic study of turbocharging/pumping operations in the restitution channel of Venda Nova II and III power reinforcements.

This work consists in the simulation of exploration scenarios of both developments by using two calculation programs which use two-dimensional numerical models and solve the flow defining equations using finite volumes methods. GUAD 2D and IBER (which allows the simulation of sediment transport). From this analysis, both model calibration and application goals were achieved, reaching a configuration that enables the simulation of a great number of scenarios of turbocharging/pumping simulations.

Keywords: 2D Hydrodynamic Modelling, Guad 2D, IBER, Venda Nova power reinforcements, simultaneous pumping and turbocharging operations.

1. Fundamentos Teóricos

Os escoamentos variáveis (ou não permanentes) ocorrem quando existe uma variação das grandezas principais do escoamento (caudal, velocidade e altura) no tempo e no espaço.

A maioria das simulações que utilizam modelos numéricos utilizam duas secções, uma inicial e outra final, como fronteiras do modelo, para entrada e saída do escoamento. Se as condições de entrada e saída corresponderem a dois regimes permanentes, o escoamento variável entre essas duas secções designa-se por transitório (Almeida, 2003).

Os escoamentos variáveis são de percepção mais difícil e a resolução analítica das equações matemáticas que os representam é difícil. A comunidade científica foi então criando e aperfeiçoando modelos numéricos de resolução das equações de águas pouco profundas com base em leis científicas, hipóteses de base e simplificações. Com a constante evolução do poder de processamento, a resolução destas equações nos vários modelos tem vindo a tornar-se menos morosa e permitindo assim o uso de modelos cada vez mais precisos. Os modelos numéricos utilizados classificam-se de hidrodinâmicos quando contém apenas equações de conservação da massa líquida e quantidade de movimento (OCS, 2016; Antunes do Carmo, 2004). Estes modelos podem ser complementados com informação de transporte sólido.

Os modelos bidimensionais são considerados nos casos em que não se verifica a existência de uma direção de escoamento dominante. O estudo dos escoamentos transitórios tem em conta uma formulação bidimensional quando se considera a direção principal, longitudinal do escoamento, x , e transversal ao escoamento, y . As características deste tipo de escoamentos são descritas pelas equações de Saint-Venant, derivadas das equações de Navier-Stokes, que supõem que o movimento do fluido segue os princípios da conservação da massa e da quantidade de movimento e que permitem a obtenção dos valores da velocidade e altura em cada instante, num determinado ponto do espaço.

As equações que governam os escoamentos variáveis bidimensionais representam as leis da conservação da massa líquida e da quantidade de movimento. Designam-se equações de águas pouco profundas (*shallow-water equations*) pois aplicam-se a escoamentos em que a dimensão vertical é negligenciável face à escala horizontal. Na derivação das equações considera-se a distribuição da pressão como sendo hidrostática, negligenciando a aceleração vertical das partículas de água (Yu, 2013).

Escoamentos que podem ser representados por estas equações são escoamentos de superfície livre em rios ou canais artificiais e escoamentos resultantes de uma rotura de uma barragem (Zhou *et al.*, 2001).

Estas equações são de demonstração matemática mais complicada, pois formam um sistema hiperbólico de leis de conservação não linear. Estas equações podem ser encontradas em Abbot (1979) e Zhao *et al.*, (1994). As equações diferenciais são apresentadas na sua forma conservativa de seguida:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U) \quad [1]$$

em que U representa um vetor físico das variáveis dependentes, F e G correspondem ao vetor fluxo na direção x e y , respetivamente, dos limites de um volume de controlo e S representa os termos relativos à inclinação dos fundos e ao atrito devido às partículas do leito. Estas componentes são definidas do seguinte modo (Toro, 2001):

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}; F(U) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} \\ huv \end{bmatrix}; G(U) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} \end{bmatrix} \quad [2]$$

$$S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad [3]$$

sendo h a altura do escoamento, u e v as velocidades médias na direção longitudinal, x , e transversal, y , ao escoamento, respetivamente, e g a aceleração da gravidade. As componentes S_{0x} e S_{fx} correspondem ao declive do fundo do canal e as componentes S_{fx} e S_{fy} são as componentes devido ao atrito da água com as partículas do fundo do canal (rugosidade) correspondentes a:

$$S_{0x} = \frac{\partial z}{\partial x} \text{ e } S_{0y} = \frac{\partial z}{\partial y} \quad [4]$$

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \text{ e } S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad [5]$$

Existem vários métodos numéricos para resolver as equações de águas pouco profundas, que não possuem soluções analíticas. Exemplos desses são os métodos de diferenças finitas, de elementos finitos e de volumes finitos. Estes métodos têm todos como base a divisão do espaço num número finito de células.

A resolução das equações passa por discretizar o espaço por onde o escoamento se processa em polígonos, que correspondem a células que fazem parte de uma malha estruturada ou não.

O método dos volumes finitos tem como ponto de partida a forma integral das equações e consiste na divisão do domínio de estudo em volumes de controlo contíguos aos quais são aplicadas as equações de conservação. Este método combina as vantagens dos métodos de diferenças finitas e elementos finitos: a simplicidade na existência de valores discretos para os valores das variáveis e flexibilidade geométrica (a malha não necessita de ser quadrangular e os elementos podem ser diferentes entre si), respetivamente (Murillo *et al.*, 2006), (Zhao *et al.*, 1994). Outra vantagem prende-se no facto de que os métodos de volumes finitos não requerem um esforço computacional tão elevado como o necessário para o método dos elementos finitos.

Os métodos de volumes finitos são usados para discretizar as equações de águas pouco profundas na forma de integral: para cada célula de uma malha integram-se as equações no intuito de obter os valores das variáveis descritas para o centro geométrico (nó) da mesma. Para este método a divisão do espaço pode ser feita de modo irregular, ou seja, é possível obter células quadrangulares ou triangulares no plano horizontal. As superfícies dos volumes de controlo (células) correspondem às linhas da grelha e os valores dos fluxos são calculados por métodos numéricos em função dos valores dos nós.

2. Caso de Estudo

Os reforços de potência de Venda Nova localizam-se no norte do país, a cerca de 40 km a nordeste da cidade de Braga. Os aproveitamentos, apresentados na Figura 1, situam-se entre as albufeiras da barragem de Venda Nova, a montante, e da barragem de Salamonde, a jusante, tirando partido do diferencial altimétrico entre as duas referidas albufeiras de 420 m e da capacidade de armazenamento de ambas.

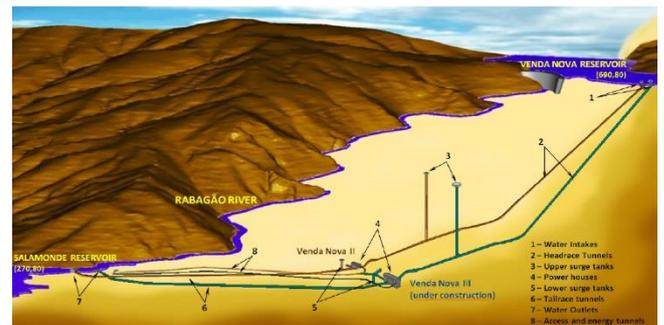


Figura 1. Esquema dos aproveitamentos hidroelétricos de Venda Nova II e III (Ribeiro *et al.*, 2014).

Em 2005 foi concluído o reforço de potência de Venda Nova II, que possuía 2 grupos turbina-bomba reversíveis com capacidade para turbinar $2 \times 25 \text{ m}^3/\text{s}$, com potência instalada de 97.1 MW (EDP, 2009), cujo objetivo era o de expandir o sistema eletroprodutor nacional, aproveitando os caudais que eram descarregados em situações de cheia. Este aproveitamento proporcionou um maior controlo do armazenamento de água para suprimir os problemas de falta de energia devido à funcionalidade intermitente das fontes renováveis existentes. Ainda antes da conclusão do segundo reforço de potência de Venda Nova, que previa já um segundo reforço de potência para o futuro. As duas centrais existentes (Vila Nova e Venda Nova II) possuíam já um caudal instalado que absorve os caudais afluentes à albufeira de Venda Nova. Deste modo, a construção de um novo empreendimento visou maioritariamente a bombagem e reserva para períodos de pico.

Em 2008 foi decidido que o projeto de Venda Nova III seria realizado para $200 \text{ m}^3/\text{s}$ distribuídos por 2 grupos, fixando-se a potência instalada nos 781 MW que, até à data, é a maior potência instalada no país (EDP, 2008). A construção começou em 2010 e as obras encontram-se em fase de conclusão, tendo um custo aproximado de 320 milhões de euros (EDP, 2010a). O empreendimento irá ser um dos ativos mais importantes da EDP, pois é o primeiro empreendimento equipado com grupos reversíveis de velocidade variável (EDP, 2010b), podendo fornecer uma resposta rápida às flutuações de consumo: picos de consumo e diminuição brusca do vento.

A estrutura de restituição de Venda Nova III situa-se cerca de 110 m a montante da homóloga de Venda Nova II e o sentido natural do escoamento no canal de restituição é de sul para norte (Figura 2).



Figura 2. Disposição das estruturas no canal de restituição

3. Método de Trabalho

Recorrendo a *softwares* de desenho computarizado, criou-se um desenho de todo o canal de restituição e estruturas adjacentes, que serviu de base para os modelos físicos do terreno a empregar nos *softwares* de cálculo. A elaboração dos modelos físicos foi executada tendo em conta informação topográfica dos projetos de Venda Nova II (2005) e Venda Nova III (2009), que resultaram na topografia apresentada na Figura 3.

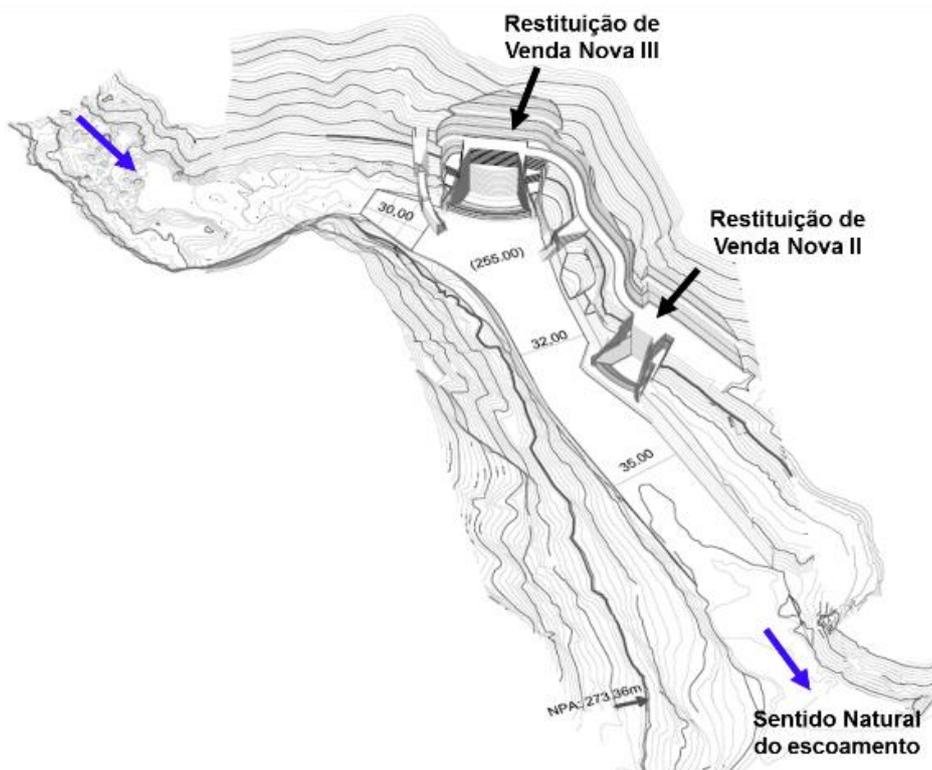


Figura 3. Topografia da zona de estudo: zona de montante na parte superior e zona de jusante na parte inferior.

Definiram-se como cenários para a calibração e validação dos modelos numéricos aqueles em que ocorre funcionamento de operações de bombagem ou turbinamento nos dois reforços de potência em simultâneo.

A validação dos modelos foi efetuada através da comparação de resultados obtidos no GUAD 2D e no IBER e com os resultados para os mesmos cenários nos ensaios em modelo reduzido realizados no âmbito do projeto de Venda Nova III. Estes resultados correspondem a instantes de tempo após ocorrer estabilização do escoamento nos modelos.

A comparação dos resultados resultou numa validação dos modelos numéricos para as operações de turbinamento ou de bombagem em simultâneo, como é possível verificar na Figura 4 que corresponde a um perfil de velocidade obtido numa secção situada entre as duas estruturas de restituição para um cenário em que ocorre turbinamento de 200 m³/s em Venda Nova III.

O sentido positivo do escoamento é o sentido natural no canal. A componente longitudinal da velocidade do escoamento é representada pela velocidade transversal ao perfil e a componente transversal da velocidade é representada pela velocidade longitudinal ao perfil. Isto, porque na zona a estudar os escoamentos são complexos, pelo que é difícil analisar os resultados com as direções naturais do escoamento.

É possível verificar que os resultados obtidos em ambos os modelos numéricos são muito similares e compatíveis com os resultados obtidos em modelo reduzido (pontos no gráfico). Aproveu-se, então, a utilização destes modelos para a simulação de operações de turbinamento e bombagem em simultâneo nos dois aproveitamentos. Estes cenários dividem-se em dois conjuntos: o primeiro corresponde a operações de turbinamento em Venda Nova III e bombagem em Venda Nova II (Figura 5-esq.) e o segundo a operações recíprocas (Figura 5-dir.).

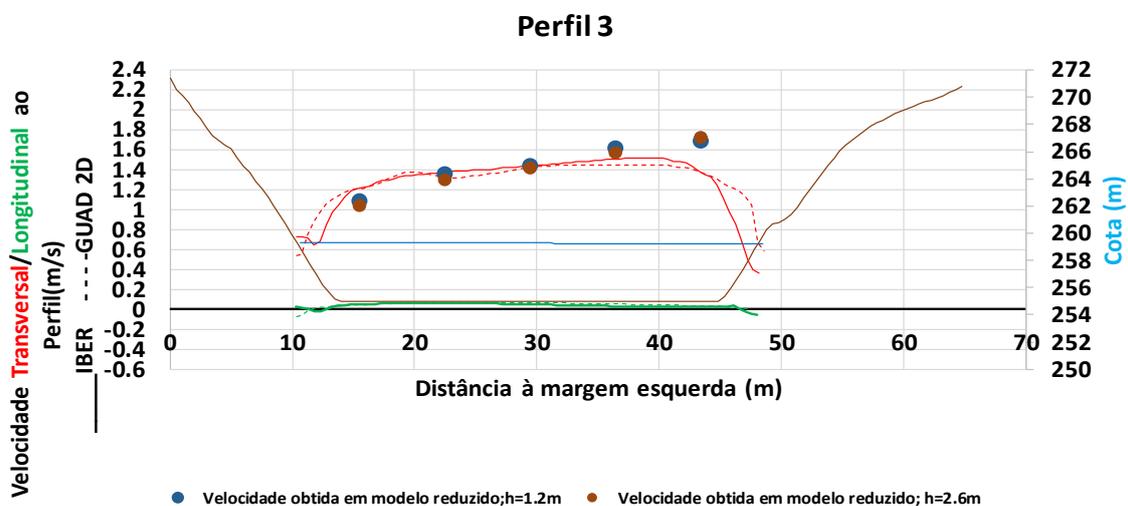


Figura 4. Perfil de velocidade numa secção situada entre as duas estruturas de restituição.

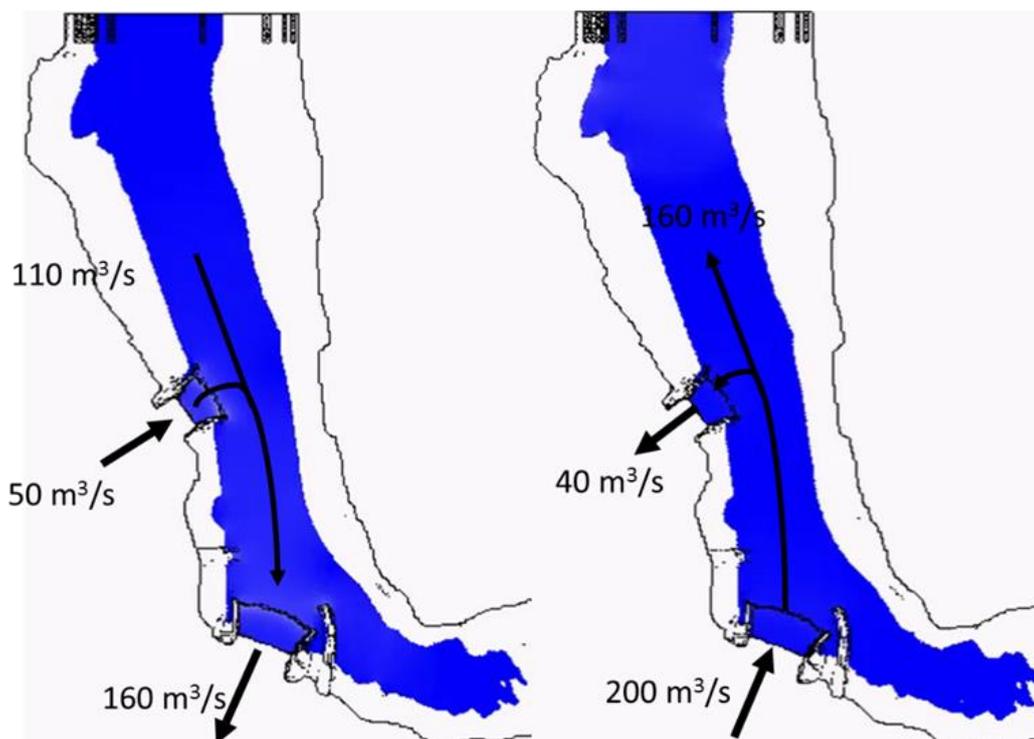


Figura 5. Exemplo de operações nos dois aproveitamentos e sentido do escoamento resultante no canal de restituição. Operações de turbinamento em Venda Nova III e bombagem em Venda Nova II (à esquerda na figura) e operações recíprocas (à direita na figura).

A complexidade dos escoamentos no canal exige que seja efetuada uma análise ao longo de toda a extensão da zona de estudo pelo que se analisou as velocidades quantitativamente e qualitativamente em 4 perfis de velocidades, complementando a informação exposta em mapas de velocidade.

Complementarmente ao estudo, foram efetuadas simulações com transporte de sedimentos por arrastamento, um módulo disponível no modelo IBER, que permite visualizar a evolução do fundo do canal com as várias configurações do escoamento. Foi utilizada a equação para transporte sólido por arrastamento de Meyer-Peter e Muller (1948) disponível no IBER. Por fim, foram analisados todos os resultados de modo a retirar conclusões sobre a viabilidade de realização de operações de turbinamento e bombagem simultâneas.

4. Resultados

A complexidade dos escoamentos resulta em configurações dos mesmos diferentes para cada cenário. Sobretudo para os níveis da albufeira mais baixos, sendo o nível mínimo estudado correspondente ao nível mínimo de exploração normal ($N_{men}=260.56$ m).

Para os cenários em que ocorre turbinamento em Venda Nova III e bombagem em Venda Nova II verifica-se um escoamento uniformemente distribuído entre as duas estruturas de restituição.

Na zona da restituição de Venda Nova II, a orientação dessa estrutura provoca um fenómeno de recirculação já no interior da mesma (Figura 6).

Para os cenários em que ocorre bombagem em Venda Nova III e turbinamento em Venda Nova II verifica-se, na Figura 7, que a orientação da restituição de Venda Nova II (direciona o escoamento da margem esquerda do canal para a margem direita), originando uma concentração do escoamento junto à margem direita do canal, com velocidades elevadas devido à diminuição da secção efetiva do escoamento, o que significa a existência de recirculações junto à margem esquerda.

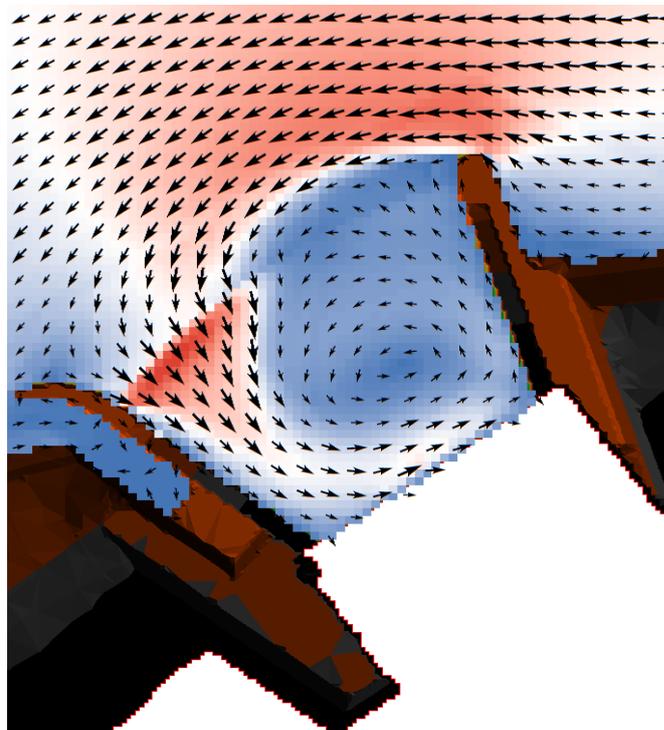


Figura 6. Recirculação no interior da restituição de Venda Nova II.

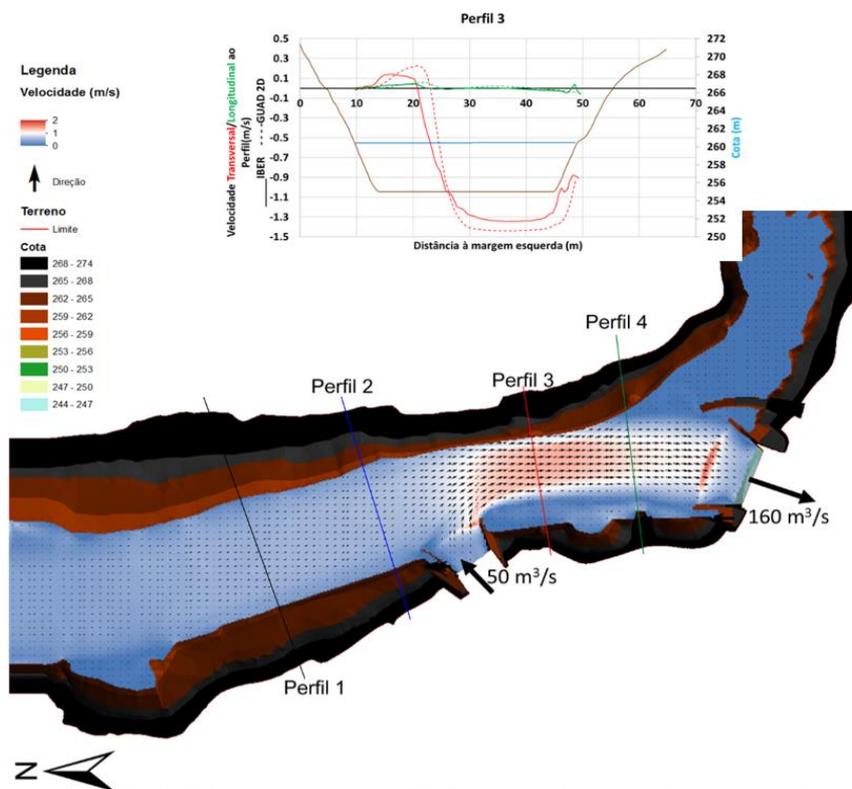


Figura 7. Mapa de velocidade e perfil 3 para operações de bombagem em Venda Nova III e turbinamento em Venda Nova II.

Quanto às simulações com transporte de sedimentos, para as simulações com funcionamento de Venda Nova III em bombagem, verificou-se uma acumulação gradual de sedimentos junto ao lábio da restituição. Quando a cota superior da camada de sedimentos atinge um valor próximo da cota superior do lábio começa a haver entrada para o interior da restituição. Este fenómeno ocorre para um instante de tempo inferior para o caso em que há funcionamento dos dois grupos, quer em Venda Nova II, quer em Venda Nova III.

Para o cenário em que Venda Nova II funciona em bombagem e Venda Nova III em turbinamento, verifica-se de igual modo uma acumulação de sedimentos junto à restituição de Venda Nova II, mas sendo a cota superior do lábio da restituição um metro superior à homóloga de Venda Nova III, não se verifica a entrada de sedimentos para o interior da estrutura de restituição.

As simulações com transporte de sedimentos foram realizadas para uma configuração inicial do fundo do canal considerada a mais gravosa, correspondente à configuração final de um ensaio em modelo reduzido de adução de sedimentos pela fronteira de montante do modelo sem funcionamento de nenhum dos grupos dos aproveitamentos. O calendário curto impediu a realização destas simulações no modelo numérico.

A Figura 8 representa a configuração do fundo do canal para um instante de tempo de 10 horas após a entrada em funcionamento dos dois grupos de ambos os aproveitamentos (cenário mais gravoso) com os caudais indicados na figura.

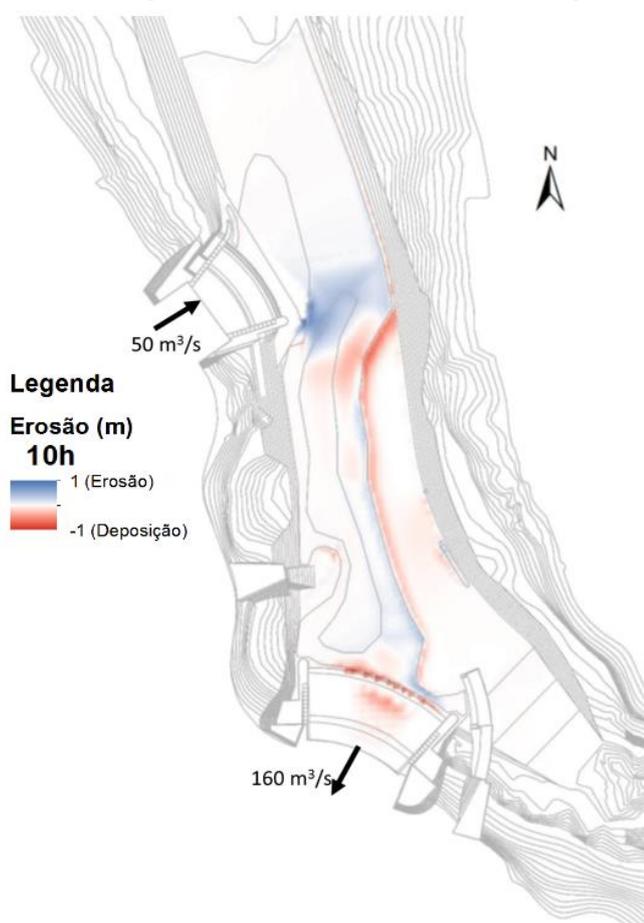


Figura 8. Evolução do fundo do canal ao fim de 10 horas de simulação.

A cor vermelha na figura representa deposição de sedimentos e a cor azul representa erosão. Verifica-se o transporte de sedimentos na direção do escoamento e o mesmo é maior junto à margem direita do canal, que corresponde à zona onde a velocidade do escoamento é superior. Verificou-se que ocorre entrada de sedimentos para o interior da restituição de Venda Nova III representada pela cor vermelha presente no interior da referida estrutura.

5. Conclusões

A utilização de dois modelos numéricos para a simulação de manobras de turbinamento e bombagem simultâneas no canal de restituição dos reforços de potência de Venda Nova permitiu concluir que ambos os modelos representam bem o escoamento, reproduzindo bem os campos de velocidade, incluindo a deteção de zonas de recirculação e a sua influência no restante escoamento.

Os casos mais gravosos encontrados correspondem ao funcionamento de dois grupos (o maior caudal) nos dois aproveitamentos, quer em turbinamento, quer em bombagem e para o nível mais baixo da albufeira, isto porque originam velocidades superiores no canal.

Quando Venda Nova III opera em bombagem e Venda Nova II em turbinamento, ocorrem velocidades elevadas junto à margem direita, o que pode provocar erosão dessa margem, pelo que se sugere a monitorização do local sempre que se efetuem este tipo de operações.

Para o cenário inverso, com turbinamento em Venda Nova III e bombagem em Venda Nova II, a recirculação no interior da estrutura de restituição de Venda Nova II pode potenciar a vorticidade e a entrada de ar para o circuito de Venda Nova II. Tais fenómenos não são passíveis de análise por modelos numéricos simples, como aqueles utilizados, pelo que é necessária a monitorização no local para verificar se esses fenómenos ocorrem.

Foram efetuadas simulações para a cota da superfície livre 265.00 m que permitiram concluir dois pormenores importantes:

- Não ocorre entrada de sedimentos para o interior da restituição de Venda Nova III quando este aproveitamento funciona em bombagem;
- Para o mesmo cenário, as velocidades no canal são inferiores àquelas verificadas para um nível da superfície livre de 260.56 m e ocorrem numa zona central do canal, o que reduz a probabilidade de ocorrência de erosão na margem direita do canal.

Por estes dois motivos, sugere-se que a cota 265.00 m seja o nível mínimo da superfície livre para a exploração do sistema em operações de turbinamento e bombagem simultâneas.

Referências

Abbot, M. B. (1979). *Computational Hydraulics Elements of the Theory of Free Surface Flows*. London. Pitman Publishing Ltd., 1979. ISBN 0-273-01140-5.

- Almeida, A. B. (2003). *Escoamentos variáveis com superfície livre*. Apontamentos para as Aulas Teóricas de Hidráulica II. Instituto Superior Técnico.
- Antunes do Carmo, J. S. (2004). *Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente*. Imprensa da Universidade de Coimbra. ISBN 978-989-26-0364-3
- EDP (2010a). Reforço de potência de Venda Nova, atual. 2010. [Consult. 20 fev. 2016]. Disponível em: http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/empreendimento.php?item_id=87>.
- EDP (2010b). EDP contrata equipamentos para barragem de Ribeiradio e reforço de Venda, atual. [Consult. 20 fev. 2016]. Disponível em: <http://www.a-nossa-energia.edp.pt/noticias/artigo.php?id=34>>.
- EDP Gestão da Produção de Energia, S. A. (2008). *Venda Nova III Reforço de Potência de Venda Nova*. Projeto Volume I-Memória Geral.
- EDP Gestão da Produção de Energia, S. A. (2009). *Venda Nova III Reforço de Potência de Venda Nova – Definição da Solução para Projeto*.
- Meyer-Peter, E. e Müller, R. (1948). *Formulas for Bed-Load Transport*. uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7. Stockholm.
- Murillo, J., García-Navarro, P., Brufau, P. e Brugete, J. (2006). *Extension of an explicit finite volume method to large time steps (CFL>1): application to shallow water flows*. International Journal for Numerical Methods in Fluids. ISSN 0271-2091. Pp. 63–102.
- OCS. (2016) *How Hydrodynamic Models Are Used [Em linha]*, [Consult. 20 abr. 2016]. Disponível em: <https://nauticalcharts.noaa.gov/learn/hydrodynamic-model-development.html>].
- Ribeiro, V., Oliveira, A., Amaral, S., Falcão de Melo, J. e Fernandes, J. (2014) *Venda Nova III Repowering Project: Outlet and Downstream Channel Scale Model Studies*. 3rd IAHR Europe Congress. Book of Proceedings.
- Ribeiro, V. e Pinto, P. (2007) *River Canals Downstream Hydropower Schemes*. Publicação interna EDP Produções.
- Toro, E. (2001). *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., ISBN 0-471-98766-2.
- Yu, Ch. (2013). *Two dimensional finite volume model for simulating unsteady turbulent flow and sediment transport*. University of Arizona Libraries. Tucson.
- Zhao, D. H., Zhen, H., Tabios, G. e Lai, J. (1994). *Finite-Volume Two-Dimensional Unsteady-Flow MODEL FOR RIVER BASINS*. Journal of Hydraulic Engineering. pp. 863–883. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:12(1497).
- Zhou, J., Causon, D., Mingham, C. Ingram, D. (2001) *The Surface Gradient Method for the Treatment of Source Terms in the Shallow-Water Equations*. Journal of Computational Physics. ISSN 00219991. 168. pp.1–25.