

## UM ESTUDO NUMÉRICO DO VENTO EM RESERVATÓRIOS DE CENTRAIS HIDROELÉTRICAS: EFEITO DA ESTRATIFICAÇÃO ATMOSFÉRICA

A numerical study of the wind over a hydroelectric reservoir: effects of the atmosphere stratification

Claudio de Castro Pellegrini

Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG

### Resumo

*O presente trabalho apresenta um estudo numérico do vento em reservatórios de centrais hidroelétricas em condições de não neutralidade, utilizando o WRF em alta resolução. O número de Richardson foi usado para quantificar a estabilidade dinâmica. As simulações foram realizadas para o reservatório de Furnas, na região de Guapé, onde se dispõe de dados anemométricos a 20 e 40 m acima da lâmina d'água no período de uma semana. Os resultados mostraram-se promissores.*

**Palavras-chave:** *Potencial eólico. Reservatórios de hidroelétricas. Modelo WRF*

### Abstract

*This work presents a numerical study of the wind in hydropower plants reservoir under non neutral conditions using WRF with high resolution. The Richardson number was used to evaluate the dynamic stability. The simulations were run for Furnas reservoir, where anemometric data were available at 20 and 40 m above the surface of the water, during a one week period. The results were encouraging.*

**Keywords:** *Wind potential. Hydropower plants reservoir. WRF model*

## 1 Introdução

Para a manutenção do caráter limpo e renovável da matriz elétrica brasileira são indiscutíveis os benefícios da inserção da energia eólica. Primeiro, para evitar crises como a do “apagão” de 2001 e, segundo, devido à sua reconhecida complementaridade sazonal com a hidroeletricidade. Ainda que os custos variem devido a questões políticas e fiscais, dentre as fontes renováveis não convencionais, a eólica é a única a apresentar custos que se aproximam aos da geração fóssil (PELLEGRINI; NETO; ASSIS; ASSIREU, 2015).

Atualmente o aproveitamento eólico no Brasil se dá principalmente em regiões planas e litorâneas, porém, essa fonte de energia ainda tem muito a ser explorada em locais de relevo complexo. Dentre estes, os reservatórios de centrais hidroelétricas têm se mostrado um local promissor (ASSIREU; PIMENTA; SOUZA, 2011) ao introduzir regiões de convergência para o vento, favorecendo sua intensificação e persistência direcional. Diversos fatores, porém, ainda precisam ser estudados neste tipo de relevo e a influência da estratificação atmosférica é um deles. Os efeitos da estabilidade dinâmica foram recentemente estudados (CAMPOS, 2015) por simulação de microescala no reservatório de Furnas. Foram realizadas rodadas mensais consecutivas, totalizando um ano (12/2013 a 11/2014), posteriormente separadas por estação do ano. A influência, estudada através do número de Richardson, foi, portanto, de caráter sazonal.

O presente estudo é um aprofundamento do resultado anterior. Aqui o número de Richardson também é usado para quantificar a estabilidade dinâmica da atmosfera, mas o estudo é focado em uma semana, durante a qual os dados são separados nos períodos diurno e noturno. O objetivo final desta contribuição, e do projeto maior onde ela se insere, é tentar compreender melhor o aproveitamento eólico em lagos de grandes centrais, nas mais diversas condições.

## 2 Metodologia

O reservatório de Guapé (MG), localizado na central hidroelétrica de Furnas, foi escolhido para o estudo. Para tentar validar as simulações, estas foram comparadas com dados observados em um experimento de campo, obtidos de uma torre anemométrica localizada em  $20^{\circ}44'26,07''S$  e  $45^{\circ}57'27,03''O$ , próximo à margem do reservatório. Os dados foram coletados a 20 e 40 m acima da lâmina d'água entre 07 e 14/06/2009.

Todas as simulações foram realizadas usando a versão 3.5 do Modelo WRF. O Modelo foi rodado para os sete dias do período do experimento, dividido em sete rodadas de 36 h, para reduzir a propagação de erros. As primeiras seis horas de cada rodada foram consideradas tempo de ajuste do modelo e descartadas. Este período é maior do que o necessário para as ondas sonoras atravessarem o domínio maior, ajustando o vento ao terreno (WANG; DUDHIA; CHEN, 2017) e não havia indícios de convecção profunda, de modo que seis horas foram consideradas suficientes para o estudo. Cada rodada individual cobriu com folga bilateral o período de um dia e uma noite, permitindo avaliar a influência da estratificação atmosférica sobre o potencial eólico. As rodadas foram iniciadas às 00:00 UTC de um dia e finalizadas às 12:00 UTC do dia seguinte. Os períodos de dia e noite foram considerados entre 06:00 UTC do primeiro dia e 12:00 UTC do dia seguinte, conforme os horários aproximados de nascer e pôr do sol local na época do ano considerada.

Escolheu-se uma configuração de domínios aninhados e centralizados, para melhor detalhar a região alvo do problema, figura 1. O centro das grades foi posicionado sobre a torre para minimizar erros de interpolação.

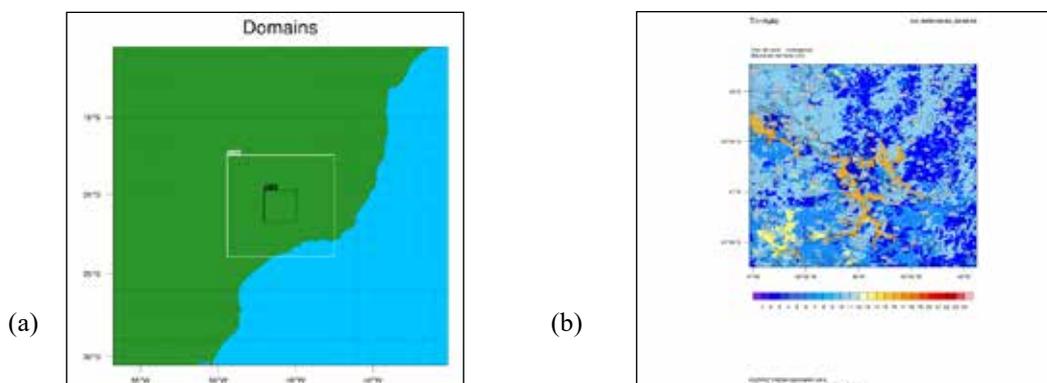


Figura 1- Aninhamento dos domínios simulados (a) e posicionamento do reservatório de Guapé (em laranja) no domínio menor (b)

A alta resolução da grade menor, 0,9 km, foi escolhida de forma a coincidir com a resolução máxima dos dados geográficos estáticos utilizados (USGS, resolução 0,5'). Para aumentar progressivamente a resolução das grades aninhadas até a dos dados de inicialização, foi usada uma relação de 5:1 entre a resolução dos domínios. Com isso chegou-se à configuração de

três domínios quadrados com 101 pontos no domínio maior, 161 no intermediário e 251 no menor. Um passo de tempo de 120 s foi usado no domínio maior. Uma alta resolução vertical de 47 níveis foi utilizada, com concentração próximo à superfície. Níveis foram posicionados a 10 m e 120 m AGH para que se pudesse calcular as velocidades e o número de Richardson global nestas alturas (equação 1) com um mínimo de interpolações.

$$R_B = \frac{(g\Delta\theta_V/T_V)\Delta z}{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2} \quad (1)$$

em que todos os símbolos tem o significado tradicional.

O número de Richardson de fluxo (Rf) tem sido utilizado como parâmetro para avaliar a estabilidade local da camada limite planetária. Em condições estaticamente estáveis, a flutuação (negativa) tende a suprimir a turbulência, enquanto o cisalhamento (negativo) tende a alimentá-la e, portanto,  $Rf > 0$ . Na atmosfera estaticamente instável, apenas a flutuação se inverte, e  $Rf < 0$ . Naturalmente,  $Rf = 0$  implica atmosfera neutra. Para a situação dinâmica, este limite usualmente vai para  $Rf = 1$ . Em micrometeorologia, raramente há informação suficiente para o cálculo de Rf, e a equação 1 é utilizada. Neste caso, o limite dinamicamente neutro pode ser fixado em 0,25, se a camada considerada (120-10 m aqui) for delgada o suficiente.

As parametrizações físicas usadas foram as mesmas em todos os domínios, exceto no menor, onde não foi usada a parametrização de cúmulos. Os esquemas adotados foram os usualmente encontrados na literatura, cuja aplicabilidade está bem documentada no manual do WRF. Foram utilizados os esquemas Lin et al., RRTM, Dudhia, Eta Similarity Monin-Obukov, Mellor-Yamada e Bets-Miller-Janjic para a parametrização respectivamente da microfísica de nuvens, radiação de onda longa, radiação de onda curta, camada superficial, trocas com a superfície e nuvens cúmulos.

Todas as simulações foram inicializadas com os dados FNL de reanálise do Modelo global GFS do NCEP, com resolução de 1° (aprox. 108 km) e seis horas. Esses dados também foram utilizados como condição de contorno durante a integração, como usual.

### 3 Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra a série temporal da velocidade do vento observado e simulado a 20 m, períodos de acomodação excluídos. A descrição dos dados é qualitativamente boa, com diferenças quantitativas localizadas. Na média diária os valores previstos e observados aderem-se bem, de modo que previsões da velocidade e do potencial eólico médios diários (figuras 3 a 6) tornam-se confiáveis. Uma série para 40 m foi gerada, mas não é apresentada por ser muito semelhante.

O comportamento esperado de um reservatório de grandes proporções sobre a atmosfera próxima é o de tentar inverter a estabilidade do terreno. Devido ao alto calor específico da água, ela tende a ser mais fresca que seu entorno em condições instáveis (geralmente o dia) e mais quente em condições estáveis (geralmente à noite). A proteção vegetal ao redor do reservatório atua no mesmo sentido. Além disso, ela tende a resfriar o ar e a aumentar sua umidade, alterando TV e  $\Delta\theta_V$  com um efeito sobre RB difícil de prever a priori. O relevo e o reservatório causam aceleração do vento, aumentando o gradiente vertical de velocidade e reduzindo RB. Estas tendências foram comprovadas em quase todos os dias simulados, conforme descrição a seguir. Por questões de espaço, nem todos os resultados são apresentados graficamente.

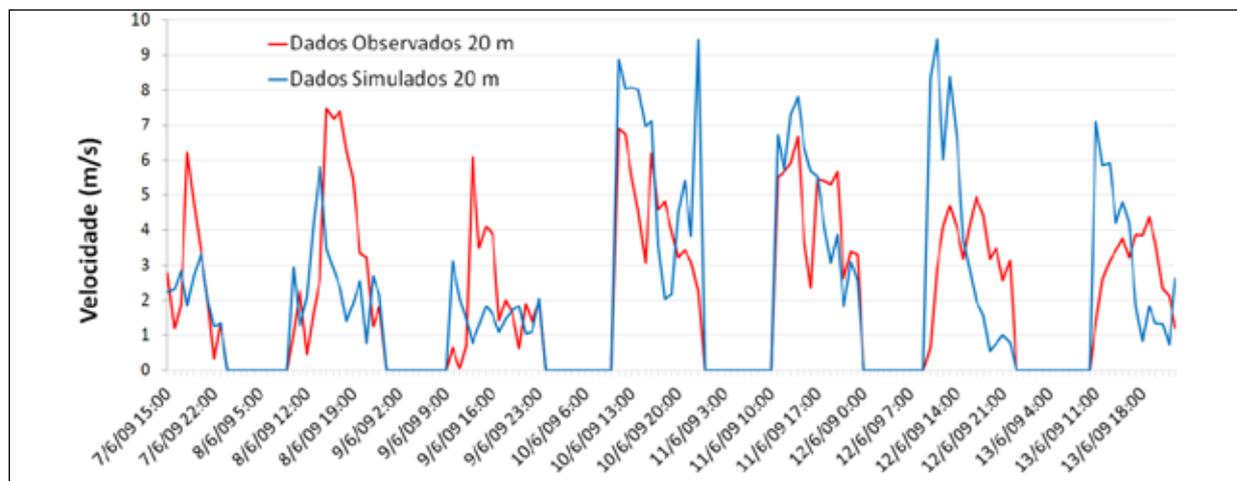


Figura 2 - Série temporal de velocidade do vento a 20 m.

Na parte diurna da rodada de 07/06, o comportamento esperado do reservatório foi verificado na simulação, figuras 3 e 4, com pontos isolados de alta estabilidade no braço NO, devido à desaceleração a jusante da crista montanhosa NO. O tradicional efeito acelerador do reservatório praticamente não ocorreu. Por outro lado, uma queda de temperatura potencial virtual ocorreu tanto a 10 quanto a 120 m. Durante a noite, o comportamento esperado também ocorreu, com velocidades muito baixas no domínio, exceto no relevo inclinado da crista NO, que exibe altos valores de RB devido à desaceleração do escoamento na crista. O reservatório apresenta temperatura potencial virtual ligeiramente maior que o entorno, particularmente visível a 10 m.

Na parte diurna de 08/06 (não mostrada) não se verifica muita aceleração no reservatório e a desaceleração observada a montante e a jusante na crista NO gera altos valores de RB. A queda de temperatura aparece mais no braço E a 120 m. À noite, o comportamento observado durante o dia em relação a RB e temperatura potencial virtual, inverte-se como esperado. A anomalia de RB no braço NO permanece, devido às baixas velocidades associadas.

Na parte diurna de 10/06 (não mostrada), há pouca variação espacial de RB durante o dia em todo o domínio, exceto na região S, devido a velocidades localmente baixas. Durante a noite, novamente a região de baixa velocidade encontra-se no S do domínio, mas compensada por uma queda de temperatura, não cria diferenças significativas em RB.

No período diurno de 11/06, o comportamento de RB não parece claramente associado à presença do reservatório, pois a velocidade e a temperatura também não parecem. Trata-se de um dia de ventos relativamente intensos (5 a 6 m/s a 10 m). No período noturno, figuras 5 e 6, a presença desestabilizadora do reservatório foi mais notável, devido à uma noite mais fria. As variações de velocidade parecem menos associadas ao reservatório do que ao relevo circunvizinho. Apenas um dos braços do reservatório (segundo do S para N, localizado na parte SO) está alinhado ao vento E predominante, mostrando um aumento localizado de velocidade, como verificado por Pellegrini et al. (2015).

No período diurno de 12/06, RB apresentou-se negativo tanto no terreno quanto no reservatório. A temperatura apresentou-se quase homogênea e elevada em todo o domínio. A velocidade apresentou queda em todo o reservatório, exceto nos braços alinhados ao vento E predominante. Durante a noite, a temperatura do reservatório esteve mais alta que o entorno, levando ao comportamento esperado de RB, a despeito da velocidade.

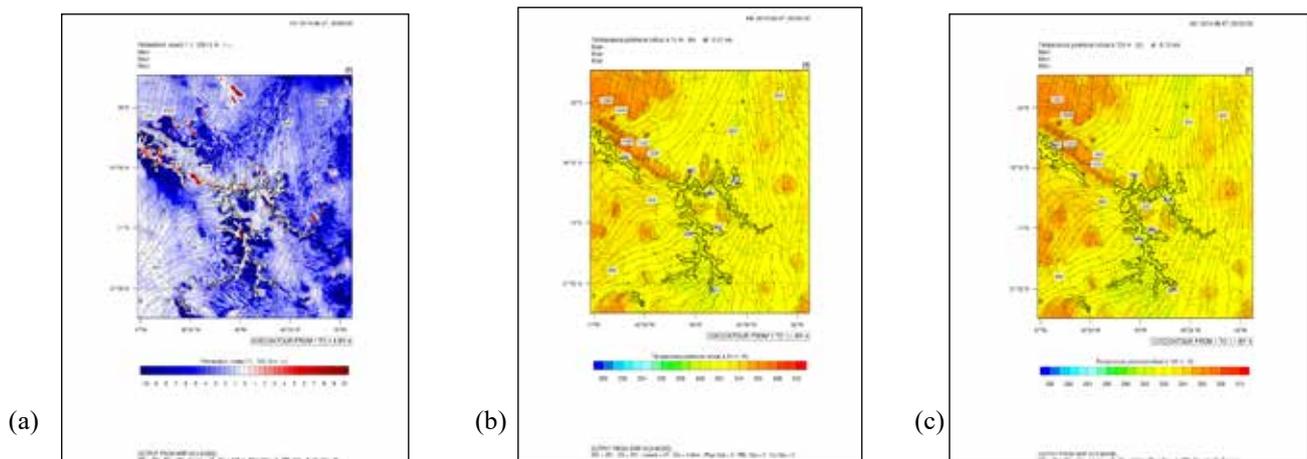


Figura 3 - RB (a), temp. pot. virtual a 10 m (b) e 120 m (c). Médias do dia de 07/06.

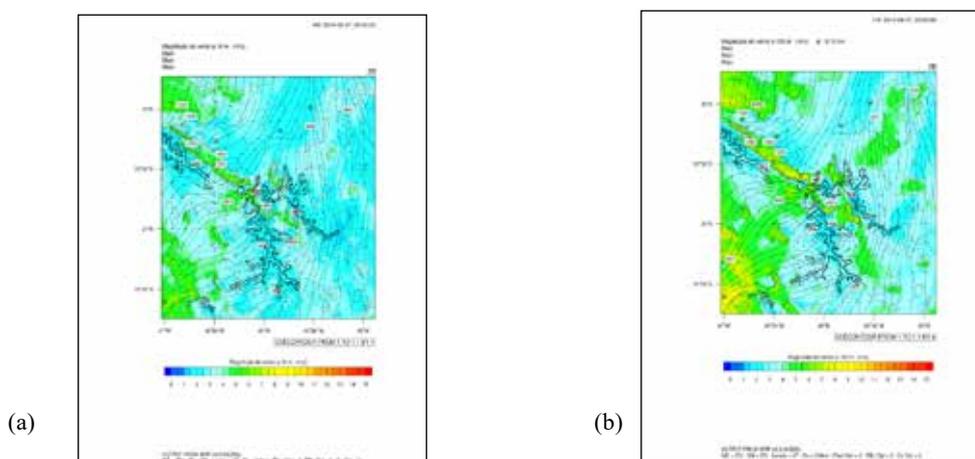


Figura 4 - Velocidade do vento a 10 m (a) e 120 m (b). Médias do dia de 07/06.

Por fim, no período diurno de 13/06, verificou-se pequena influência do reservatório sobre a temperatura, de modo que as diferenças verificadas em RB estão mais associadas à variações da velocidade. À noite, o reservatório apresentou-se mais quente e a velocidade não teve variação significativa. Assim, a temperatura foi o fator principal para a variação de RB, que teve o comportamento esperado.

## 4 Conclusões

Foram realizadas simulações numéricas para a região do reservatório de Furnas, utilizando o WRF V3.5. Obtiveram-se as distribuições horizontais médias nos períodos diurno e noturno para a velocidade, a temperatura potencial virtual nas alturas de 10, 30, 50, 80 e 120 m acima do solo e foi calculada a distribuição horizontal de RB entre os níveis 10 e 120 m. Nem todos os resultados foram mostrados.

As simulações mostraram o efeito instabilizante noturno e estabilizante diurno esperado. Ficou claro, contudo, que a interação entre a estratificação atmosférica e o relevo pode ser bastante complexa. O relevo escarpado próximo ao braço NO do reservatório, por exemplo, é responsável por variações de velocidade que afetam RB em quase todos os dias simulados. O tradicional efeito acelerador do reservatório, porém, só foi verificado em poucos casos, devido ao relevo complexo. A velocidade só apresentou um aumento considerável nos braços do reservatório alinhados ao vento predominante.

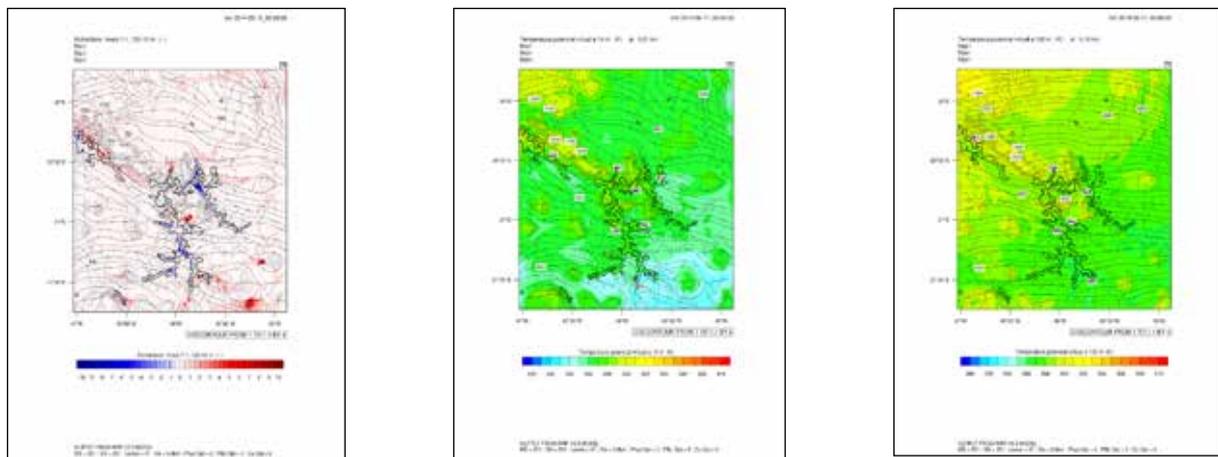


Figura 4 – RB (a), temp. pot. virtual a 10 m (b) e 120 m (c). Médias da noite 11/06.

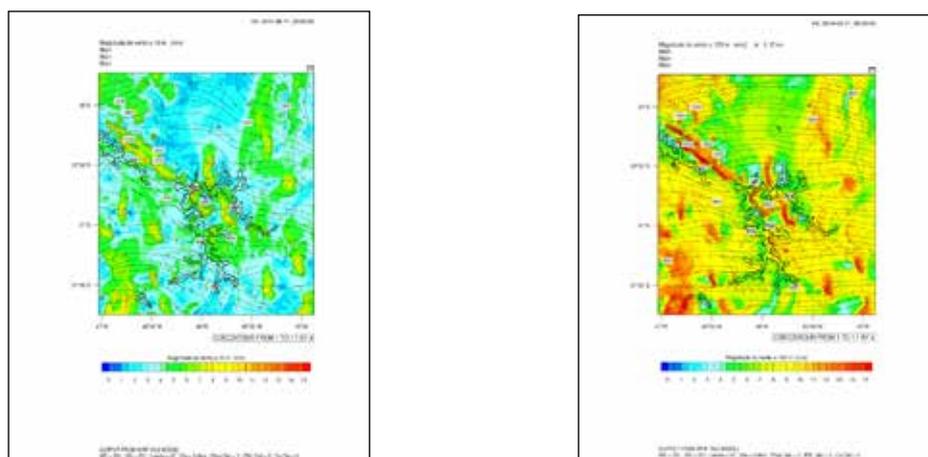


Figura 5 - Velocidade do vento a 10 m (a) e 120 m (b). Médias da noite 11/06.

## Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq, CAPES e LGSA.

## Referências

ASSIREU, A., PIMENTA, F., SOUZA, V. Assessment of wind power potential of hydroelectric reservoirs. Em: Energy resources: development, distribution and exploitation, pp. 1-28. 2011.

CAMPOS, B. The Wind Energy Resource of a Large Tropical Aquatic System: High Resolution Numerical Assessment And the Atmospheric Stability Effects to Power Production. 2015. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Graduação em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

PELLEGRINI, C. C. , L. NETO, A. V. , ASSIS, J. V. B. , ASSIREU, A. T. . Um Estudo Numérico da Intensificação do Vento em Reservatórios de Centrais Hidroelétricas da Região Sudeste do Brasil. Ciência e Natura, v. 36, p. 121-, n. 2015.

WANG W., DUDHIA J., CHEN M., 2017 UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH, Best Practices of WRF. Disponível em: <[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201701/best\\_prac.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201701/best_prac.pdf)> Acesso em: Acessado em 28 ago 2017.

Claudio de Castro Pellegrini

Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG  
E-mail: pelle@ufsj.edu.br