

Estudo da utilização de sistemas eólicos em conjunto com pequenas centrais hidrelétricas de armazenamento bombeado

Study of the use of wind energy systems combined with small pumped storage hydroelectric power plants

Patrícia Moniz de Arruda, patricia.moniz@aluno.ufabc.edu.br

Julio Carlos Teixeira, julio-carlos.teixeira@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo

Submetido em 13/09/2015

Revisado em 15/10/2015

Aprovado em 01/03/2016

Resumo: Para verificar a capacidade de pequenas centrais hidroelétricas de superar a variabilidade das fontes eólica e hidráulica, modelou-se tal sistema com dados de vento e vazão de rio da fronteira entre Paraná e Santa Catarina, uma turbina hidráulica e uma bomba de 10,5MW, aerogeradores de 174kW e dois reservatórios de 10^7m^3 . Com uma potência eólica instalada de 13,2MW garantiu-se operação hidráulica nominal o ano todo, evitando o esvaziamento do reservatório e atendendo a demanda de pico diária.

Palavras chave: Armazenamento bombeado. Pequena Central Hidrelétrica Reversível. Sistema hidroelétrico.

Abstract: To verify the capability of small hydroelectric power plants to overcome the variability of eolic and hydraulic sources, such system was modelled with wind and river flow rate data from the border between Paraná and Santa Catarina, 10,5MW hydraulic turbine and pump, 174kW eolic turbines and two 10^7m^3 reservoirs. With a 13,2MW installed eolic capacity, the nominal hydraulic operation through the year was guaranteed, avoiding the emptying of the reservoir and meeting the daily electric peak demand.

Keywords: Pumped storage. Small Reversible Hydroelectric Power Plant. Hydroelectric system.

Introdução

O uso de fontes renováveis de energia é uma alternativa ambientalmente apropriada ao atendimento da crescente demanda energética mundial. Um entrave dessas fontes ao atendimento da demanda é a sua intermitência: os picos de geração de eletricidade podem não corresponder aos de consumo, sendo necessário armazenar essa energia para posterior uso.

Em usinas hidrelétricas, cuja potência gerada depende da vazão que passa pela turbina hidráulica, a vazão variável do rio pode ser regularizada antes de chegar à turbina por meio de um reservatório. Quando a vazão é maior que a ideal para a operação da turbina em potência nominal, parte da água fica armazenada no reservatório, sendo utilizada quando a vazão é menor que a ideal. Logo, a energia fica armazenada na forma potencial gravitacional.

Nos sistemas de armazenamento bombeado a energia excedente de períodos de alta produção e baixa demanda é armazenada para uso em períodos de baixa produção e alto consumo. A água que já foi utilizada para produzir eletricidade é bombeada novamente ao reservatório superior em momentos de produção maior que o consumo, onde fica armazenada. Quando a demanda aumenta, a água desce do reservatório superior para o inferior. A água fica então armazenada no reservatório inferior, do qual pode ser bombeada para o superior quando a demanda diminui [4].

Em usinas hidroelétricas reversíveis a água é bombeada com utilização de eletricidade gerada por turbinas eólicas instaladas próximas à usina. Desta forma combinam-se duas fontes de energia renováveis e intermitentes, e pode-se lidar com a aleatoriedade na produção por meio do acúmulo de energia. Essa tecnologia é especialmente vantajosa em localidades em que há complementariedade hidroelétrica: em épocas do ano em que há baixas vazões do rio (devidas à estiagem), há fortes ventos, e vice-versa. No Brasil essa condição se verifica particularmente na região Nordeste [5]. Pode, também, ser utilizada em localidades que tenham bom potencial hídrico e eólico.

Há outras vantagens de ordem ambiental e energética das usinas reversíveis eólico-hidráulicas, tais como: grande capacidade de acumulação energética (a água tem densidade relativamente elevada, de modo que se pode armazenar nela grande quantidade de energia potencial gravitacional por

unidade de volume); alta confiabilidade dos equipamentos; extensiva regulação da potência de saída (mantendo-se uma eficiência praticamente constante); aplicabilidade à independência energética de localidades afastadas não conectadas à rede elétrica; potência elevada e longo tempo de vida [10].

Objetivos

A partir do estudo dos principais aspectos da implantação de pequenos sistemas de aproveitamento híbrido eólico/hidráulico de geração de energia elétrica o objetivo deste trabalho é analisar, para a região de fronteira entre os estados do Paraná e de Santa Catarina, a utilização de uma usina hidroelétrica de armazenamento bombeado para contornar a intermitência dessas fontes.

Para isso o trabalho avalia a energia total gerada anualmente utilizando a plena potência da turbina em função da potência eólica instalada para bombeamento de água. Como alternativa de análise, avalia em quanto se pode reduzir o volume do reservatório mantendo a regularização da potência gerada com a instalação de mais turbinas eólicas.

Metodologia

O projeto é baseado no desenvolvimento de um modelo no *software* MATLAB[®] para simular o desempenho de um sistema hidroelétrico.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica de padrões de ventos e de vazões de rios na região de fronteira entre os estados do Paraná e de Santa Catarina que, apesar de não ter uma boa complementariedade hidroelétrica, possui, isoladamente, bons potenciais hidráulico e eólico, com PCHs e parques eólicos em operação [5]. Pesquisou-se também os problemas típicos e da legislação referente a pequenas fontes de energia renováveis eólicas e hidráulicas: variabilidade instantânea, sazonalidade, dificuldade de armazenamento de energia, qualidade da energia e custo de implantação. A forma de modelar a variabilidade tanto da água como do vento foi gerar um histórico de vazão e de velocidade de vento a partir do estudo da região.

Em seguida desenvolveu-se o modelo que integra os dados obtidos anteriormente e realizou-se simulação no MATLAB[®] de uma PCH reversível hidroelétrica, com análise de desempenho em várias circunstâncias.

Modelagem de uma PCH reversível

Foram criados, no pacote SIMULINK do MATLAB®, modelos das máquinas elétricas e mecânicas da PCH a partir dos blocos básicos do programa. A usina hidroelétrica reversível modelada segue as restrições:

- Para garantir a regularização da geração de eletricidade mesmo com fontes intermitentes, o controle tenta manter a produção de eletricidade constante em um valor igual à potência nominal da turbina hidráulica;
- A fonte de energia principal é a hídrica, e toda a eletricidade produzida para atender à demanda energética vem da turbina hidráulica. A energia eólica é auxiliar, com o intuito apenas de bombear, do reservatório inferior para o superior, a água que é novamente utilizada para movimentar a turbina, quando a vazão do rio não é suficiente para suprir a demanda;
- Para que a potência na turbina permaneça constante, é necessário que a vazão no duto que leva do reservatório superior à turbina seja constante. Por essa razão, quando a vazão a montante do rio não é suficiente, é necessário bombear água do reservatório inferior para o superior;
- Toda a água do rio é captada para o reservatório superior. Quando a vazão a montante do rio é maior do que a capacidade de armazenamento do reservatório superior (descontada a vazão à turbina), parte da água é lançada diretamente ao reservatório inferior por um vertedouro;
- Por motivos ambientais e sociais, há regulamentações que determinam que, em PCHs com armazenamento de água para questões de regulação da geração, parte da água deve ser devolvida ao leito do rio a jusante da usina, mantendo uma vazão mínima sustentável. Esse valor deve ser 80% do valor de alimentação (vazão a montante, que abastece o reservatório superior) [2]. O modelo segue essa determinação;
- A carga da bomba é variável, uma vez que a quantidade de água bombeada do reservatório inferior ao superior é variável, e depende das vazões de entrada e de saída do reservatório inferior, do volume do reservatório superior e da quantidade de energia eólica gerada no momento;
- Por simplificação do modelo construído, a geração hidráulica e o bombeamento da água são feitos por máquinas diferentes, de modo que é possível a constante geração elétrica simultaneamente ao reabastecimento do

reservatório superior. A máquina não é, portanto, reversível. Ambas as máquinas, (turbina hidráulica e bomba), têm a mesma potência nominal, para representar uma turbina reversível em um trabalho futuro;

- Para atingir a mesma potência que a nominal da bomba com a energia eólica que a alimenta podem ser instaladas mais de uma turbina eólica;
- Para o cálculo do volume de água armazenado, os reservatórios superior e inferior foram aproximados por uma pirâmide invertida, com base triangular equilátera e ortogonal a um dos lados [2];
- Quando a velocidade do vento supera o valor determinado pela potência máxima da(s) turbina(s) eólica(s), o controle de potência é ativado, e a potência gerada não aumenta, mesmo que a velocidade do vento aumente.

O simulador possui as seguintes variáveis, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1. Variáveis do sistema modelado.

Variáveis de entrada	Variáveis internas	Variáveis de saída
vazão do rio a montante que entra no reservatório superior (Q_m)	vazão no duto da turbina hidráulica (Q_t)	volume do reservatório superior (V_s)
velocidade dos ventos (v_v)	vazão no duto da bomba (Q_b)	volume do reservatório inferior (V_i)
-	vazão de saída do reservatório inferior para o rio a jusante (Q_j)	-
-	vazão no vertedouro superior (Q_v)	-

As condições de contorno do problema, que caracterizam o modo de operação e comandam a regulação da água em cada componente, são:

- Quando mais energia eólica está disponível do que a necessária para o bombeamento (limitado pela potência da bomba hidráulica) o excesso não é utilizado. Em trabalho futuro esta energia poderia ser entregue direto à rede;

- Quando o reservatório inferior está próximo do esvaziamento, é dada prioridade ao armazenamento de água em detrimento ao cumprimento das legislações ambientais, isto é, não é enviada água de volta ao rio, para que a água remanescente no reservatório inferior possa ser armazenada. Em um trabalho futuro esta condição pode ser modificada.

Modelagem dos componentes e dos subsistemas

Subsistema “turbina hidráulica”

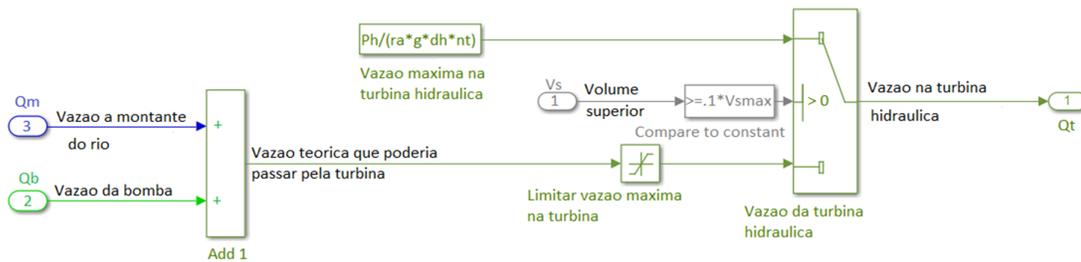
O subsistema criado para representar a turbina hidráulica baseia-se na Equação (1) a seguir, que fornece a potência elétrica gerada na turbina hidráulica em função da vazão no duto da turbina, da densidade da água, da altura da queda d’água e da eficiência da turbina:

$$P_T = \rho_{\text{água}} g Q H_T \eta_T \quad (1)$$

em que P_T é a potência da turbina, $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água (998 kg/m³), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²), Q é a vazão volumétrica (m³/s) da água no duto, η_T é a eficiência da turbina (geralmente, em torno de 90 a 95%), e H_T é a carga manométrica da turbina (a altura equivalente da coluna de água cuja pressão é igual à diferença de pressão da água antes e depois de passar pela turbina, proporcional à energia transferida da água à turbina hidráulica) [9].

A Figura 1 ilustra o subsistema de funcionamento da turbina hidráulica. Quando o volume de água no reservatório superior (que alimenta a turbina) é maior que 10% do máximo, a vazão na turbina é mantida no máximo (operação em potência nominal e geração da máxima energia elétrica possível por unidade de tempo). Quando o volume do reservatório superior é menor que 10%, a vazão (e, portanto, a potência gerada) na turbina é reduzida para um valor equivalente àquele que entra no reservatório superior: vazão a montante do rio somada à vazão da bomba, que leva água do reservatório inferior ao superior, evitando o esvaziamento do reservatório superior.

Figura 1. Diagrama de blocos da turbina hidráulica.



Fonte: autoria própria.

O subsistema criado para representar a turbina eólica baseia-se na Equação (2) a seguir, que fornece a potência elétrica gerada na turbina eólica

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_v^3 C_p \eta \quad (2)$$

em que C_p é o coeficiente de potência do aerogerador, que representa a eficiência aerodinâmica de conversão da energia cinética contida no ar em energia mecânica nas pás, e η é a eficiência da máquina [6].

Quando a velocidade do vento ultrapassa um valor aproximadamente 13% maior que a velocidade média para a localidade, o controle de potência é acionado, limitando a potência ao valor máximo. A escolha deste valor foi feita baseada em catálogos de geradores eólicos [11].

Subsistema “bomba hidráulica”

O subsistema que representa a bomba baseia-se na Equação (3):

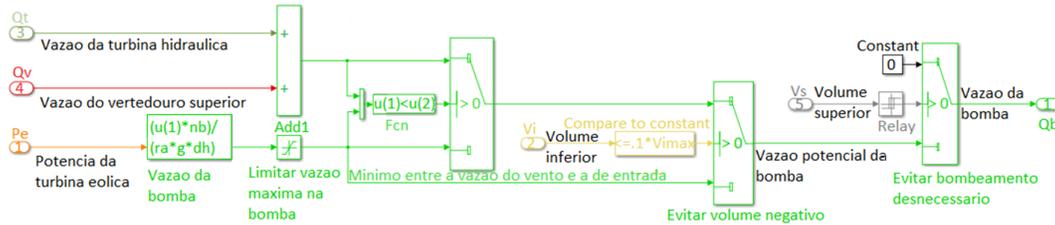
$$P_B = \frac{\rho_{\text{água}} g Q H_B}{\eta_B} \quad (3)$$

em que P_B é a potência da bomba, Q é a vazão volumétrica de água pelo seu duto, H_B é a sua altura manométrica e η_B é a sua eficiência [9].

A Figura 2 ilustra o subsistema do funcionamento da bomba. Quando o volume do reservatório inferior é menor que 10% do máximo, a vazão da bomba é igual ao menor valor entre a vazão de entrada menos a de saída (vazão da turbina hidráulica mais vazão do vertedouro superior menos vazão a jusante do rio) e a vazão máxima que o vento permite, naquele instante. Caso o valor de vazão que o vento permita seja maior que o máximo que a bomba suporta, ele será limitado ao valor máximo. Quando o volume do reservatório superior é maior ou igual a 90% do volume máximo, a bomba não é ativada, para evitar bombeamento desnecessário de água a um reservatório já cheio. Optou-se por

este valor, pois não foi feito um estudo de longo prazo do sistema integrado que deveria incluir os geradores a montante e a previsão de chuvas. Reduz-se assim a chance de transbordamento dos rios a montante.

Figura 2. Diagrama de blocos da bomba.

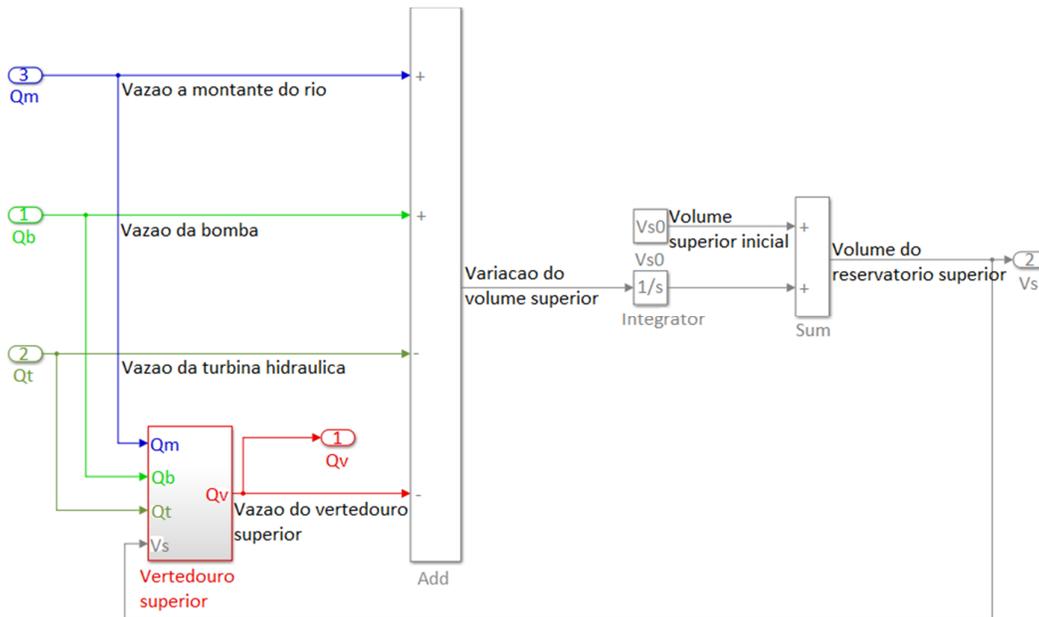


Fonte: autoria própria.

Subsistemas de controle do volume dos reservatórios superior e inferior

A Figura 3 mostra o bloco que representa o reservatório superior: o volume de água no reservatório, em cada instante, é dado pela soma do volume inicial com a integral da vazão de entrada (rio e bomba) menos a de saída (turbina hidráulica e vertedouro superior).

Figura 3. Diagrama de blocos do reservatório superior.

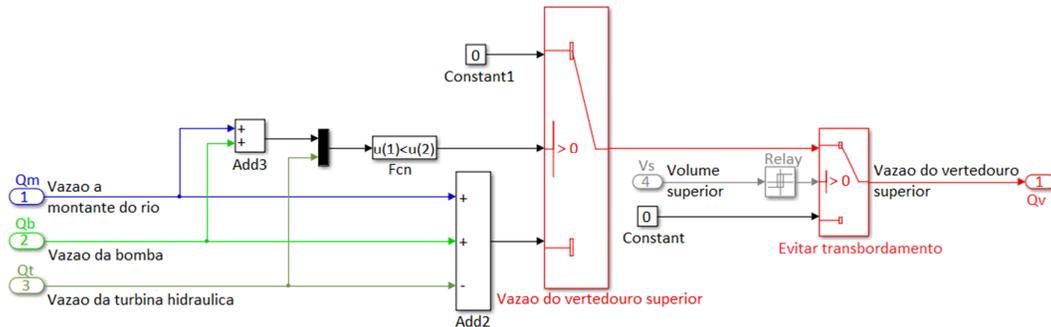


Fonte: autoria própria.

A Figura 4 traz o vertedouro superior: quando o volume do reservatório é igual ou maior a 90% do limite e a vazão de entrada no reservatório é menor

que a de saída, o vertedouro é acionado, e sua vazão é igual à diferença entre a vazão de entrada (rio e bomba) menos a de saída (turbina).

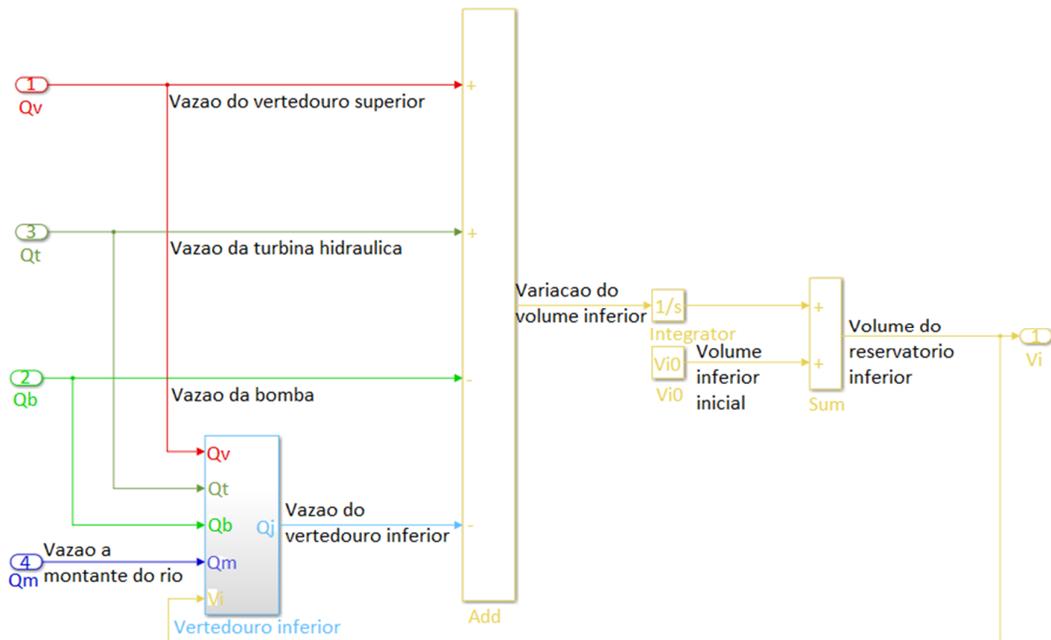
Figura 4. Diagrama de blocos do vertedouro superior.



Fonte: autoria própria.

A Figura 5 mostra o modelo do reservatório inferior: o volume de água no reservatório é a soma do volume inicial com a integral da vazão de entrada (turbina e vertedouro superior) menos a de saída (bomba e a jusante do rio).

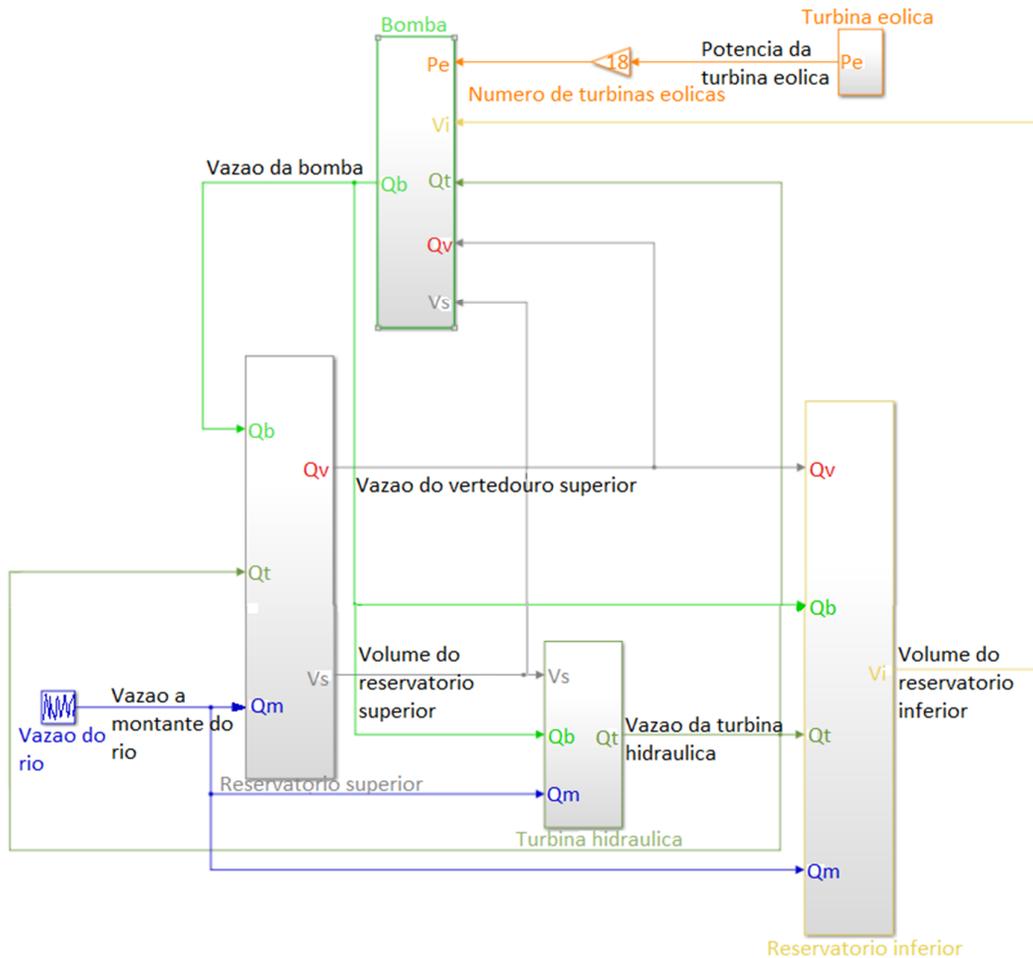
Figura 5. Diagrama de blocos do reservatório inferior.



Fonte: autoria própria.

A Figura 6 traz o modelo do vertedouro inferior: quando o volume do reservatório é igual ou menor a 10% do máximo, a vazão a jusante do rio é zero

Figura 7. Modelo da PCH reversível com os blocos integrados.



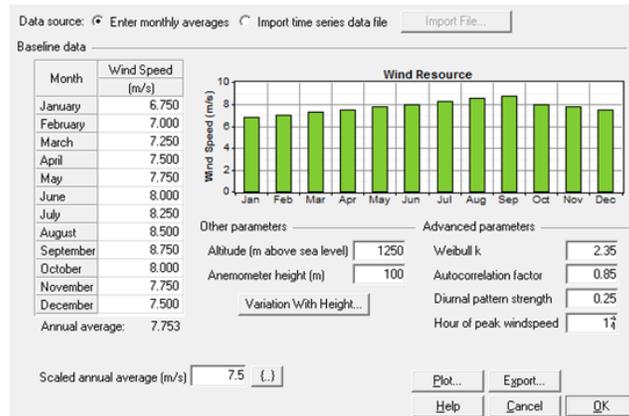
Fonte: autoria própria.

Dados da simulação

Para a determinação da energia dos ventos que alimentam a(s) turbina(s) eólica(s) do sistema, foram utilizados dados de ventos baseados em parâmetros reais da região de fronteira entre os estados do Paraná e de Santa Catarina. Foi gerada, no *software* HOMER[®], uma série aleatória de ventos, seguindo a distribuição de probabilidades de Weibull e as características da região: altitude média de 1250 metros, torres de 100 metros de altura, rugosidade do solo média de 0,025, fator de forma (k) de Weibull médio de 2,35, fator de autocorrelação de 0,85, com pico de velocidades de vento às 17h e média anual de 7,5 m/s. Estes valores foram retirados do Atlas eólico da região [1] e da escolha de uma turbina compatível com as condições médias.

Foi gerado, no HOMER[®], um ponto de velocidade de vento para cada hora do ano. As velocidades médias dos ventos em cada mês do ano podem ser visualizadas na Figura 8 a seguir.

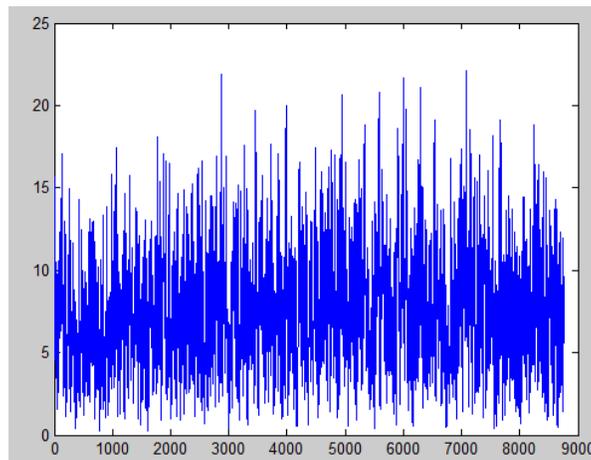
Figura 8. Médias de velocidades dos ventos em cada mês do ano.



Fonte: autoria própria.

Os pontos de velocidade do vento foram transportados para um vetor com 8760 horas/ano e inseridos no MATLAB[®], como mostra a Figura 9.

Figura 9. Velocidades de ventos transportadas para o MATLAB[®].



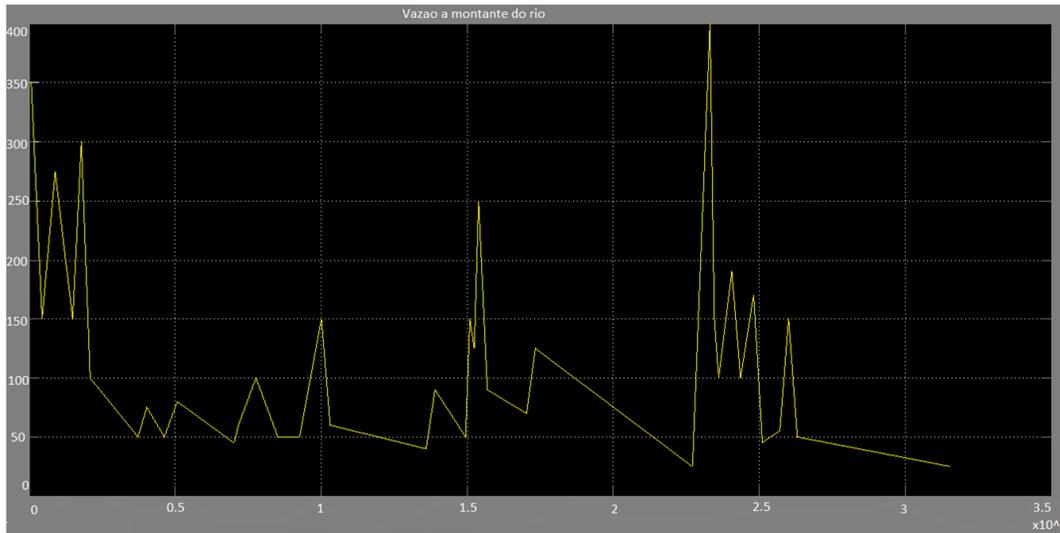
Fonte: autoria própria.

Para geração de vazões do rio que alimenta a PCH foram utilizadas as vazões do rio Chapecó, que cruza o estado de Santa Catarina próximo ao

Paraná e já possui PCHs instaladas. Foram utilizados 40 pontos de vazão anual no rio, na altura da estação fluviométrica de Abelardo Luz [3].

Com os pontos coletados foi gerado um vetor com 8760 pontos de vazão anual, que foi inserido no modelo do MATLAB[®]. O gráfico das vazões inseridas no modelo pode ser visto na Figura 10.

Figura 10. Vazão do rio Chapecó no MATLAB[®].



Fonte: autoria própria.

Além da velocidade do vento e da vazão dos rios, os parâmetros de projeto adotados na modelagem são:

- Grandezas físicas: densidade do ar = 1,225 kg/m³, densidade da água = 998 kg/m³, aceleração gravitacional = 9,81 m/s² [9];
- Parâmetros das máquinas: eficiência das turbinas eólicas = 0,9, eficiência da bomba = 0,8, eficiência da turbina hidráulica = 0,85 [9];
- Parâmetros de projeto dos reservatórios: altura da queda d'água entre um reservatório e outro de 15 m, volume máximo dos reservatórios de 10⁷ m³;
- Volume inicial dos reservatórios na simulação: 50% do total;
- Parâmetros de projeto da turbina hidráulica: potência nominal da turbina = 10,4 MW (conforme calculado pela Equação (1)), utilizando-se a vazão média do rio escolhido, que é de aproximadamente 83,7 m³/s);
- Parâmetros dos aerogeradores: raio das pás = 20 m, coeficiente de potência (C_p) = 0,594 (o C_p pode variar, mas, por simplificação, foi mantido

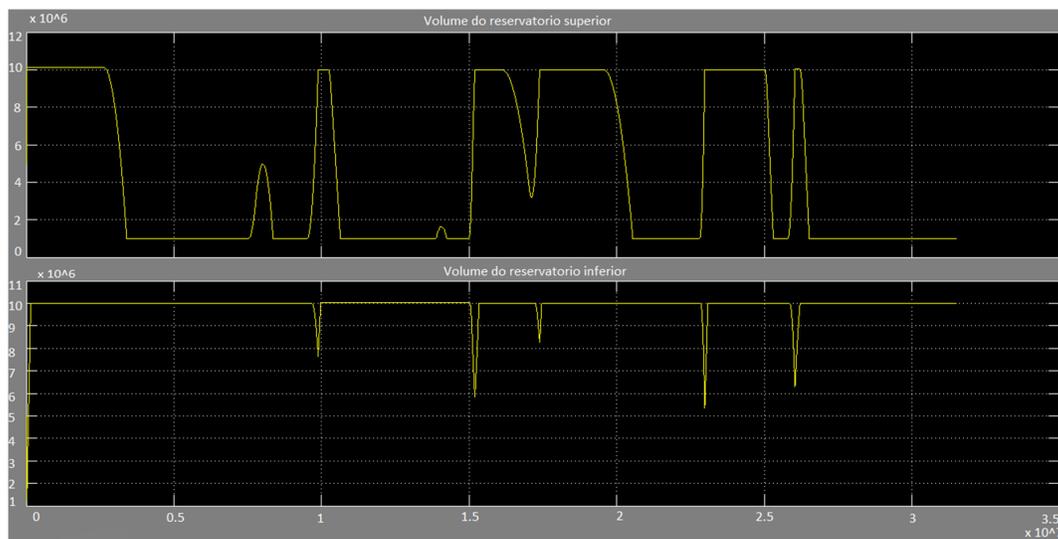
constante), potência média (adotada a nominal) de 0,17MW (conforme Equação (2)), potência máxima de 0,25 MW (conforme Equação (2)) utilizando velocidade 13% maior que a média: 8,5 m/s. Este é o máximo valor de potência que pode ser produzido por cada aerogerador, e não aumenta quando a velocidade do vento aumenta. Escolheu-se esses parâmetros para permitir maior resolução na solução.

Resultados e discussão

Determinação da potência eólica instalada

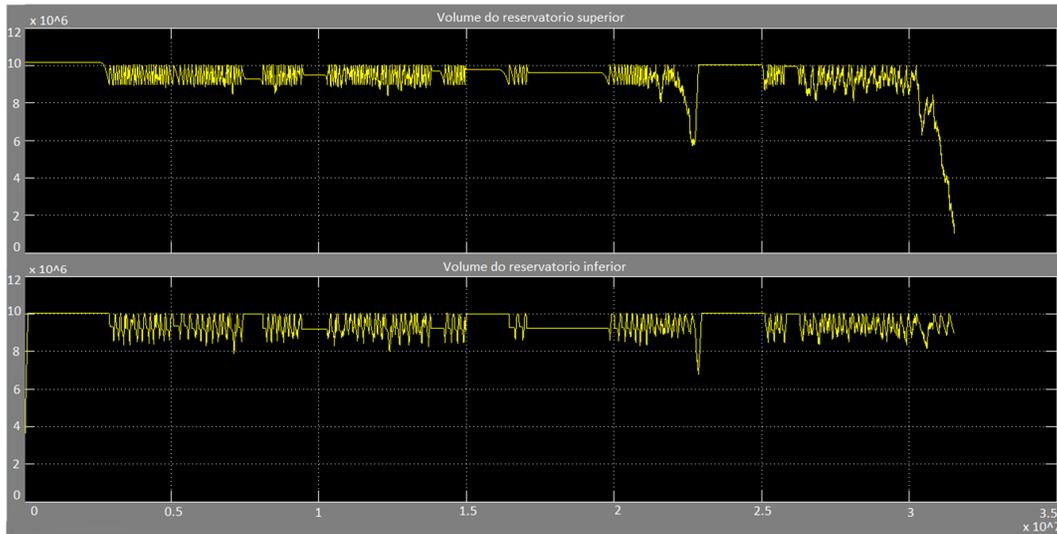
A simulação da operação da PCH foi executada por um ano. Variou-se o número de aerogeradores de zero a 76 (número encontrado para garantir operação da turbina hidráulica em potência nominal por um ano, sem esvaziamento do reservatório superior), com uma potência eólica instalada de 13,2 MW. A Figura 11 mostra a variação nos volumes dos dois reservatórios ao longo do ano sem turbina eólica instalada, e a Figura 12 mostra a variação dos volumes com 76 turbinas instaladas.

Figura 11. Volumes dos reservatórios sem bombeamento de água.



Fonte: autoria própria.

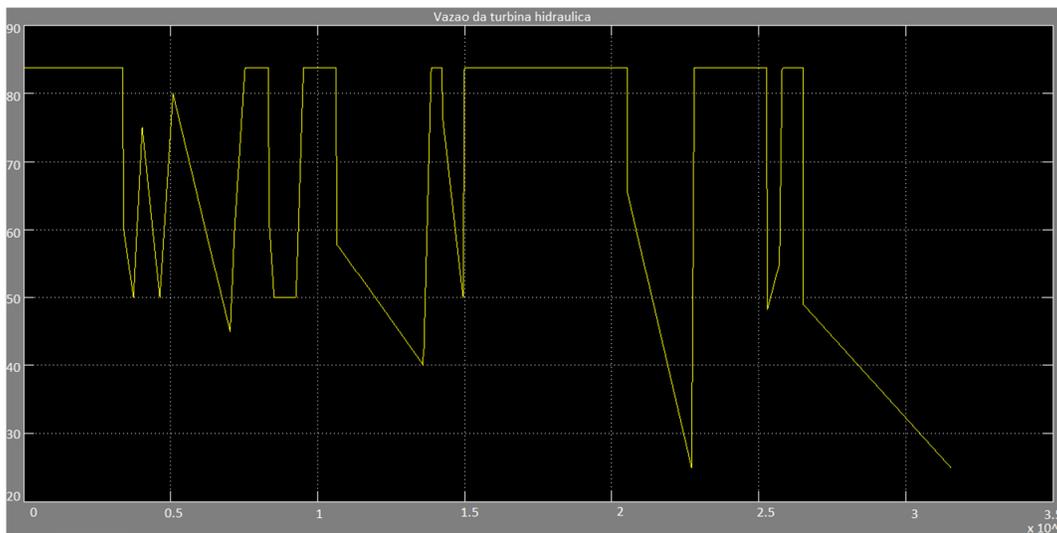
Figura 12. Volumes dos reservatórios com 76 aerogeradores.



Fonte: autoria própria.

A Figura 13 mostra a vazão no duto da turbina hidráulica ao longo do ano quando não há aproveitamento do vento para o bombeamento. Observa-se que numa boa parte do ano não é gerada a máxima potência das turbinas por falta de água no reservatório superior. Quando não há bombeamento, a energia hidráulica total gerada em um ano é de 71,4 MWh.

Figura 13. Vazão no duto da turbina sem bombeamento de água.

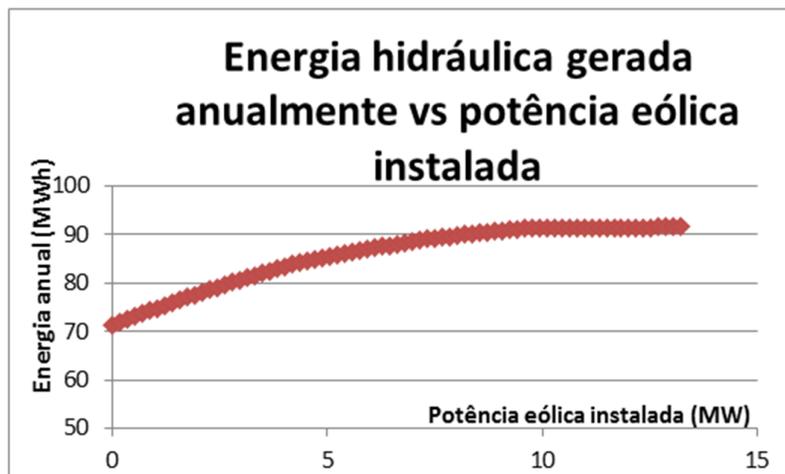


Fonte: autoria própria.

Quando há bombeamento alimentado por 76 aerogeradores (13,2 MW eólicos instalados), a energia total gerada em um ano na turbina hidráulica é de 91,5 MWh, 28% maior que a situação anterior. Quando a energia de 76 turbinas eólicas é utilizada para bombear água, o sistema fica o ano todo operando com potência máxima. Ou seja, consegue-se uma produção anual constante de eletricidade, contornando-se com sucesso o problema da aleatoriedade da vazão do rio e da velocidade do vento.

A Figura 14 mostra a relação entre o número de turbinas eólicas utilizadas para alimentar a bomba e a energia hidroelétrica produzida em um ano. Como se pode ver, ocorre um comportamento crescente da energia hidráulica produzida em função da potência eólica instalada; a energia tende a um valor máximo, que é aquele referente à operação em cada segundo do ano com potência nominal da turbina hidráulica (14,4 MW).

Figura 14. Energia hidráulica anual pela da potência eólica instalada.



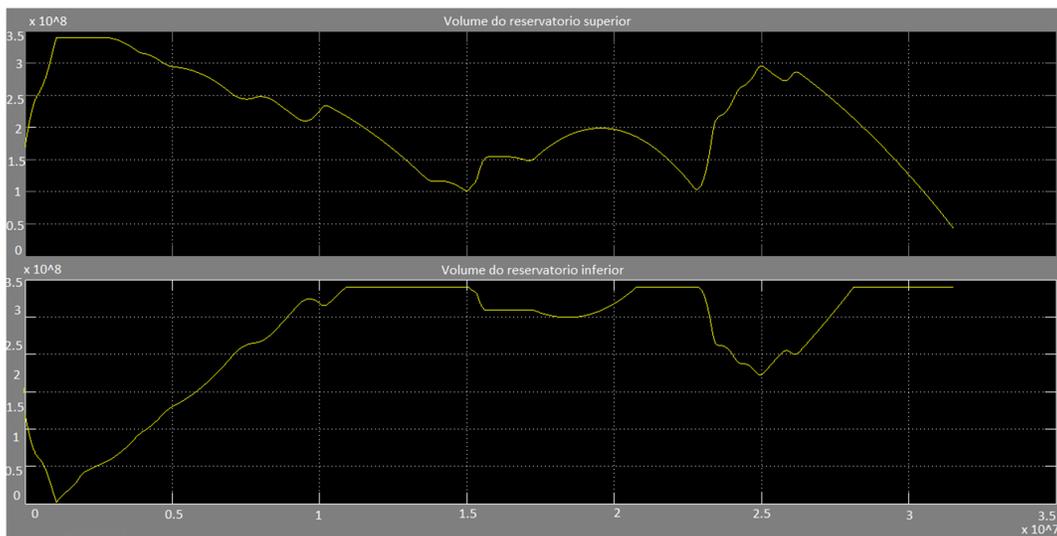
Fonte: autoria própria.

Determinação de um volume ótimo do reservatório para uma determinada potência turbinada

Os resultados anteriores foram obtidos utilizando-se o máximo volume de reservatório permitido a uma PCH (10^7 m³). Com esse valor não é possível evitar o esvaziamento do reservatório superior em pelo menos algum momento do ano se não houver ao menos 76 turbinas eólicas alimentando a bomba.

Utilizando-se um volume inicial maior para os reservatórios pode-se realizar o estudo da relação entre a potência eólica e o volume do reservatório. Sem bombeamento de água, o mínimo volume do reservatório superior necessário para garantir que nunca haja esvaziamento (volume caindo abaixo de 10% do limite) obtido pelo modelo é de aproximadamente $3,4 \times 10^8 \text{ m}^3$ (ou seja, um volume 34 vezes maior que o máximo permitido para uma PCH). A Figura 15 mostra os resultados do modelo, indicando o comportamento dos volumes de água nos dois reservatórios ao longo do ano quando o limite máximo é esse e não há bombeamento de água.

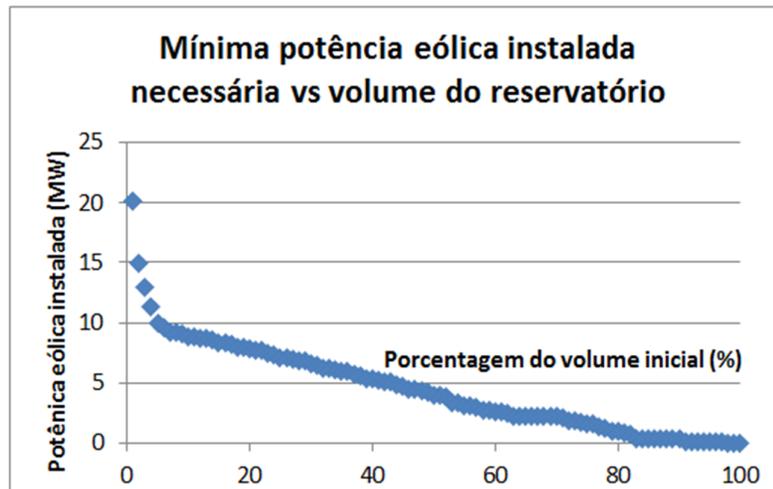
Figura 15. Volumes dos reservatórios anuais quando o volume máximo é grande o suficiente para que não ocorra esvaziamento sem bombeamento.



Fonte: autoria própria.

Partindo-se desse volume, para o qual não são necessários aerogeradores para garantir potência nominal da turbina hidráulica o ano todo, diminuiu-se o volume do reservatório para porcentagens desse valor e analisou-se quantos aerogeradores são necessários para garantir máxima geração anual de eletricidade. A Figura 16 mostra a relação entre o número de turbinas necessárias para garantir potência nominal anual e a porcentagem do volume dos reservatórios em relação ao volume inicial anterior. É possível notar uma tendência a um comportamento exponencial crescente da potência eólica necessária quanto menor o volume do reservatório.

Figura 16. Potência eólica instalada necessária para evitar o esvaziamento do reservatório pelo volume em relação ao máximo.

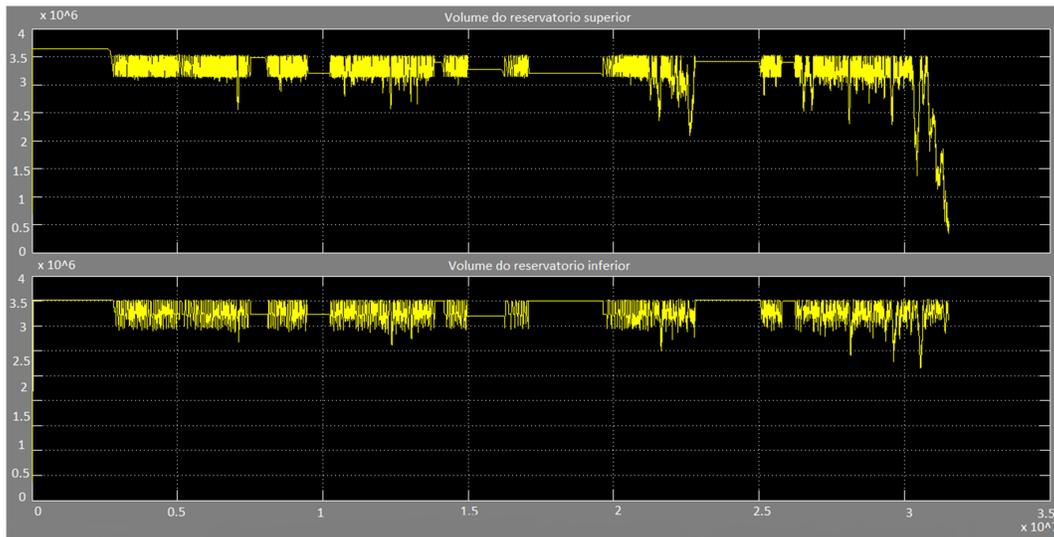


Fonte: autoria própria.

Como a Figura 16 mostra, quando se tem uma potência eólica instalada de cerca de 10 MW (mesma ordem de grandeza da turbina hidráulica), é possível reduzir o volume do reservatório para quase 5% do volume original (cerca de $1,7 \times 10^7 \text{ m}^3$), o que representa um ganho ambiental muito grande, com uma redução significativa de área superficial alagada.

A Figura 17 mostra os volumes de água dos dois reservatórios quando o volume limite é igual a 1% do volume inicial, e há 116 turbinas eólicas (20,2 MW) instaladas (número mínimo necessário para garantir operação em potência nominal o ano todo com tal volume).

Figura 17. Volumes anuais dos reservatórios com volume 1% do inicial e aerogeradores (20,2 MW) suficientes para suprir a bomba em tempo integral.



Fonte: autoria própria.

Conclusão

O modelo desenvolvido permite o estudo dos efeitos do bombeamento com energia eólica, tanto na potência gerada por uma PCH como no volume dos reservatórios necessário para a sua máxima utilização. Os resultados obtidos, baseados em dados de uma região no Sul do Brasil mostram que uma usina teve reversível de armazenamento bombeado eólica/hidráulica é capaz de contornar o problema da intermitência de suas fontes de energia e gerar eletricidade para uma demanda cujo pico não ocorre simultaneamente aos picos de vazões do rio e de velocidade dos ventos.

Além disto, mostrou-se que, projetando-se adequadamente a potência da turbina hidráulica e das turbinas eólicas, é possível minimizar significativamente o tamanho necessário dos reservatórios. Nas simulações realizadas, para volumes tão pequenos quanto cerca de 1% do inicial, o modelo permitiu determinar um número de turbinas eólicas que garanta à turbina hidráulica operar em potência nominal o ano todo. Os resultados mostram que o bombeamento de água para o reservatório superior permite uma redução significativa do volume total dos reservatórios, o que é um ganho ambiental relevante, uma vez que se diminui também a área alagada.

O modelo permitiu concluir que a utilização de sistemas eólicos em conjunto com pequenas centrais hidrelétricas reversíveis permite, de fato, obter duas vantagens principais: 1) garantia de geração de eletricidade mais estável, permitindo o atendimento da demanda mesmo quando a vazão do rio está baixa graças à água armazenada com uso de bombeamento alimentado por energia eólica, e 2) uso de reservatórios de menor volume, representando inundação de uma área menor e menores danos ambientais associados.

Referências

- [1] COPEL. **Atlas eólico do estado do Paraná**. Curitiba, 2007.
- [2] ELETROBRÁS. **Diretrizes para projetos de PCH**. Brasília, 2000.
- [3] GARCIA, L. AL. V. de. **Estudos Hidrológicos para o Dimensionamento de UHE**. Curitiba, 2007.
- [4] PAPAETFHYMIOU, S. V.; KARAMANOU, E. G.; PAPATHANASSIOU, S. A.; PAPADOPOULOS, M. P. **A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Icaria**. IEEE Transactions of Sustainable Energy, vol. 1, nº 3. P. 163-172. Atenas, out. 2010.
- [5] PEREIRA, C. S. **Complementaridade hidro-eólica no Brasil**. Universidade Federal do ABC. Santo André, 2013.
- [6] SEED. **Fontes alternativas de energia: energia hidrelétrica**. Disponível em: <<http://www.planetseed.com/pt-br/relatedarticle/fontes-alternativas-de-energia-energia-hidreletrica>>. Acesso em: 27, fev. 2014.
- [7] SIGEL – **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico**. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>. Acesso em: 23, jun. 2014.
- [8] SOU ENGENHEIRO. **Barragem de Foz Tua**. Disponível em: <<http://www.engenheirmaestri.com/2012/03/barragem-de-foz-tua.html>>. Acesso em: 27, fev. 2014.
- [9] WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. Editora McGraw-Hill, 4a edição. Rhode Island, 2012.
- [10] YANG, B.; MAKAROV, Y.; DESTEESE, J.; VISWANATHAN, V.; NYENG, P.; McMANUS, B.; PEASE, J. **On the use of energy storage technologies for regulation services in electric power systems with significant penetration of wind energy**. IEEE Xplore. Vancouver, nov. 2009.
- [11] NORWIN. **Norwin 200 kW – Main Features of Desing**. Disponível em: <<http://www.norwin.dk/norwin200kw.html>>. Acesso em: 1, ago., 2015.