



UM ESTUDO PARA RESOLVER A VARIABILIDADE DA GERAÇÃO EÓLICA ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO EM LARGA ESCALA COM GERÇÃO HIDRÁULICA

Emanuel Leonardus van Emmerik¹

Johann Michael Steinberger¹

Maurício Aredes¹

RESUMO

A implantação da geração eólica de forma otimizada com a geração hidráulica está sendo investigada como uma opção viável para auxiliar na solução do impasse que se avizinha como consequência da tendência de aproveitamento das bacias da Amazônia brasileira para expansão do parque gerador. É na validade desta investigação que este trabalho está focado. Quer se discutir se tem sentido pesquisar a viabilidade de empregar geração hidráulica para compensar a variabilidade da geração eólica, quando esta é implantada em larga escala. O trabalho inclui resultados preliminares sobre a variabilidade da geração eólica em seus diversos ciclos, e a variabilidade da disponibilidade de energia hidráulica.

Palavras-chave: energia eólica, energia hidráulica e planejamento energético.

ABSTRACT

The optimal deployment of wind generation with the hydro generation is being investigated as a viable option to assist in resolving the constraints coming ahead as a consequence of the tendency of recovery in the Brazilian Amazon basin for expansion of generating facilities. It is in the validity of this research that this work is focused. The value is shown of feasibility studies of using water power generation to offset the variability of wind

¹ COPPE – PEE



generation when it is deployed on a large scale. Preliminary results are presented for the variability of wind generation at various cycles, the variability of the availability of hydropower.

Keywords: wind energy, hydropower and energy planning

1. INTRODUÇÃO

A concepção geral das usinas hidráulicas brasileiras, nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil, convergem para o tipo de aproveitamento adequado para topografias com características de Canyons, ou seja, rios com margens medianamente altas, onde se constroem barragens entre 50 e 100 metros de altura que represam grandes quantidades de água, com alagamentos relativamente baixos, capazes de regularizar todo o rio em escalas de tempo plurianuais.

Já na região da Amazônia brasileira, onde se localiza a maior parte do potencial hídrico remanescente do país, o aspecto topográfico dominante é o de rios de planície, ou seja, as margens são relativamente baixas e as vazões variam de 3.000 m³/s no período seco a 30.000 m³/s no período molhado. Na região da Amazônia brasileira, as alturas de barragens que se revelaram tão adequadas no restante das bacias brasileiras, passam a ser inadequadas porque provocam alagamentos ecologicamente inaceitáveis.

A geração de energia eólica é atualmente a tecnologia de fontes alternativas que está tecnicamente mais bem consolidada, [ENERCON (2010), VESTAS (2010)]. A tecnologia de geração eólica, diferente da hidráulica, é relativamente nova e vem sendo empregada com sucesso em diversos países. O principal problema da geração eólica é que ela é inconstante. Ela é disponível quando existe vento e não necessariamente quando o consumidor precisa de energia. Embora inconstante, ela é previsível com boa margem de acerto. Por isto esta inconstância foi rotulada com o nome de variabilidade. A entrada de geração eólica em larga escala no SIN (Sistema Interligado Nacional Brasileiro) vai exigir repensar os conceitos, [FORTUNATO (1990)], que já são usados há tanto tempo, que, por assim dizer, muitas vezes são pouco lembrados e questionados. O principal fato motivador para esta revisão conceitual é a característica de variabilidade da geração eólica.



2. CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE DO SIN

2.1. O sistema de geração do SIN

Na tabela 1 além das hidráulicas, as térmicas a gás e a óleo combustível são as mais adequadas para, eventualmente, participar do controle da variabilidade das eólicas.

Tabela 1 - Potência instalada em 31/12/2007 (SIN + sistemas isolados)

Fonte	Nº Usinas	MW	Participação (%)
Hidrelétricas no Brasil	669	76.400	71%
Itaipu 50Hz, Acaray, Guri	3	7250	7%
Eólicas	16	247	0%
Térmicas à Gás e Óleo Combustível	702	15819	15%
Térmicas Nuclear, Carvão, Biomassa	302	7535	7%
Total	1692	107.251	100%

[MME (2007)]

2.2. Características da geração hidráulica no SIN

Os principais rios do Brasil formam as principais bacias hidrográficas das quais se destacam as que já têm os principais aproveitamentos hidroelétricos, a saber:

Tabela 2 - Capacidade de armazenamento no SIN

Região	Rios principais	Armazenamento (GW mês)
Sul	- Iguazu Uruguai, Jacuí e Capivari	18,4
Sudeste e Centro Oeste	- Paranaíba, Grande e Doce - Tietê, Paranapanema, Paraná e Paraíba do Sul - Alto Tocantins, Alto São Francisco	189,9
Norte	- Baixo Tocantins	12,4
Nordeste	- Baixo São Francisco, Paranaíba e Jequitinhonha	51,7
Total Brasil		272,4



O principal ponto a ressaltar na afluência energética destas bacias é a diversidade que ocorre entre os períodos seco e chuvoso, de um lado nas bacias da região Sul e de outro lado nas bacias da região Sudeste, Norte e Nordeste. No período de dezembro a abril, na Região Sul, ocorre a estação seca, enquanto que neste mesmo período, nas regiões Sudeste, Norte e Nordeste ocorre a estação chuvosa.

As usinas hidráulicas são construídas para uma geração média conforme o aproveitamento. Tipicamente a motorização é feita acrescentando 20% a esta média. A esta motorização pode-se acrescentar uma máquina adicional para cobrir os períodos de manutenção.

2.3. Características da geração eólica no SIN

No Brasil, a relação entre a geração eólica média e a geração máxima instalada é de 25 a 30%.

As duas principais plantas eólicas no Brasil de 2007 – 2008 são:

- Rio do Fogo, com quase de 50 MW na costa do estado do Rio Grande do Norte;
- Parques eólicos em Osório, com 150 MW, na costa do estado do Rio Grande do Sul.

Nestas fazendas, observa-se o potencial eólico é máximo nos meses de agosto a novembro. Nestes meses justamente ocorre o inverso com o potencial hidráulico.

O potencial de geração de energia eólica em terra no Brasil é de 140 GW pico, [CRESEB (2010)]. Considerando o fator de capacidade típico de 30% obtém-se um potencial de 42 GW médios, sendo uma grande parte localizada no Nordeste do Brasil. Assumindo um crescimento de 4,5 % ao ano, o potencial de eólico poderia suprir algo como a carga de todo o Brasil nos próximos 17 anos.



3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A TECNOLOGIA DE GERAÇÃO EÓLICA

3.1. Medida de inserção de energia eólica

Inserção é energia eólica gerada (GW médios no ano) medida em relação à carga anual do sistema, [AKERMANN (2008), CUSTÓDIO (2009), DWIA (2010). Atualmente, EWEA (2010)], a meta de inserção de energia alternativa (eólica e outras) na Europa é de 20%

Exemplo:

- Em 11/09/2008 o pico de carga SIN = 65,6 GW ponta e 55,9 GW médios, ONS (2010);
- Inserção de 20% da carga do SIN ==> $55,9 * 0,2 = 11,2$ GW médios de eólica;
- Fator de Capacidade da Geração da Eólica = 30%;
- Potencia eólica a instalar para ter uma inserção de 20% = $11,2 / 0,3 = 37$ GW pico de capacidade instalada de eólica para ter os 20% de inserção;
- Proinfa, [MME (2007)], no leilão de 2009 = 13 GW pico;
- Inserção com 13 GW pico = $20\% * 13 / 37 = \sim 7\%$.

3.2. A potência eólica não requer a mesma quantidade de reserva de potência

Os benefícios da agregação em um sistema de energia que cobre uma grande área geográfica ajudam na redução das flutuações de energia eólica e melhoraram a previsibilidade. O impacto da distribuição geográfica de fazendas eólicas adicionais sobre a produção agregada foi estudado, [AKERMANN (2008), ROSAS (2003)], e os resultados indicam que a alegação frequentemente declarada, de que a energia eólica exige uma quantidade igual de energia de reserva para o back-up não é correta.

A capacidade de transmissão entre as áreas é fundamental para a utilização dos benefícios decorrentes de grandes áreas de produção. Um mercado de eletricidade no qual as previsões de produção podem ser atua-

lizadas para algumas horas à frente também ajuda a manter baixos os erros de previsão e, assim, os custos de energia de equilíbrio.

3.3. Variabilidade da energia eólica - anual e diária no SIN

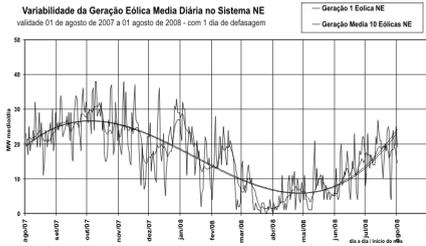


Figura 1 - Variabilidade da geração eólica média diária no sistema Nordeste

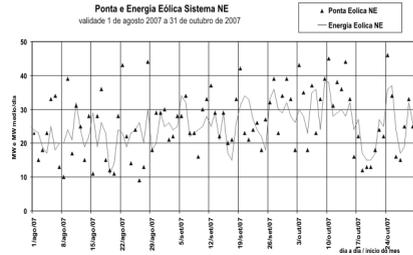


Figura 2 - Variabilidade da geração eólica na hora de ponta no sistema Nordeste

Podem ser observadas três variabilidades Energéticas no Nordeste:

- Variabilidade com período anual (curva que lembra uma senoide);
- Variabilidade diária para uma única fazenda eólica (Rio do Fogo);
- Variabilidade para 10 eólicas hipotéticas, em 10 locais diferentes com 1 dia de defasagem do vento num total de 50 MW.

Observe nas figuras 1 e 2 que a dispersão geográfica das eólicas não resolve as muitas vezes em que a geração é quase nula no período de março a maio. Mesmo no período onde a eólica cresce para o seu máximo anual pode-se observar três situações para a variabilidade de potencia no Nordeste:

- Em alguns dias a ponta é maior que a média diária podendo atingir a capacidade instalada de Rio do Fogo;
- Em outros dias a ponta é da mesma ordem da média diária;
- Há vários dias onde a ponta é bem menor que a média, podendo inclusive ser quase zero.



4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A TECNOLOGIA DE GERAÇÃO HIDRÁULICA

Os principais componentes das usinas hidráulicas, de interesse para este trabalho, são: o reservatório, porque é capaz de ser um elemento armazenador de energia, e o conjunto turbina gerador, porque é capaz de transformar esta energia armazenada em potência.

4.1. A potência e energia de um aproveitamento hidráulico

A potência, [SOUZA (1999)], de um aproveitamento hidráulico é dada pela equação (1):

$$P(h) = 9,81 \times 10^{-3} Q h \mu \quad (1)$$

Sendo:

$P(h)$ = potência em MW para queda h

$9,81$ = aceleração da gravidade

10^{-3} = fator de conversão para MW

Q = vazão em m^3 /segundo

h = queda bruta em metros

μ = rendimento, em torno de 0,90

A densidade da água é tomada como sendo de 1000 kg/m^3

A energia armazenada em um reservatório hidráulico é dada pela equação (2):

$$E(h) = 0,38257 p(h) V(h) \quad (2)$$

Sendo:

$E(h)$ = energia armazenada em MW mês para uma queda h

$p(h)$ = produtividade do aproveitamento em $MW/(m^3/s)$

$V(h)$ = Volume de água armazenada no reservatório em hm^3

$0,380257$ = fator de conversão de unidades

Em uma cascata de reservatórios, [KELMAN (2002)], a energia armazenada de um reservatório específico é obtida de forma semelhante à equação (2), mas multiplicando o volume armazenado no reservatório específico, pela soma das produtividades do próprio reservatório e de todos os outros que estão a jusante dele.

4.2. Potência, energia e área inundada em uma usina hidráulica

A equação (1) mostra a relação linear entre a potência P e a queda h . Já a equação (2) mostra que a energia armazenada está relacionada com o volume do reservatório e, portanto relacionada exponencialmente com a área inundada e a queda h . Assim, substituindo um aproveitamento por dois em cascata (ver figura 3), a potência P se mantém, mas a área inundada e energia E caem exponencialmente. Consorciando as hidráulicas com as eólicas, no extremo, as hidráulicas só precisam ser fontes de potência e, portanto, não precisam ter área inundada

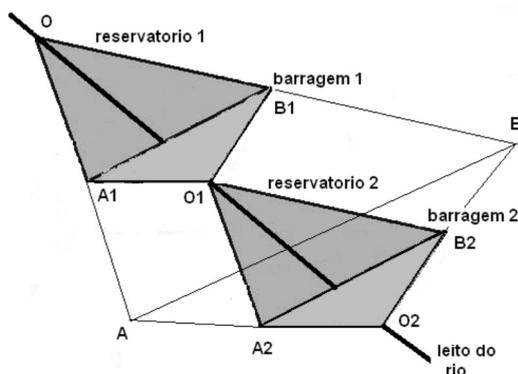


Figura 3 - Efeito da divisão de um aproveitamento em dois

4.3. Variabilidade da afluência de energia hidráulica

Também a afluência de energia hidráulica tem uma variabilidade, principalmente anual que é compensada pela capacidade de armazenamento dos reservatórios. Nos meses de janeiro a junho a afluência hidráulica é maior do que a carga e o excesso de energia é armazenado nos reservatórios. Nos meses de julho a dezembro, a afluência não é suficiente para atender à carga e a energia faltante é obtida deplecionando os reservatórios. Nestes meses se gasta a energia que foi armazenada no período de cheia. As figuras 4 a 7 ilustram estes fatos.

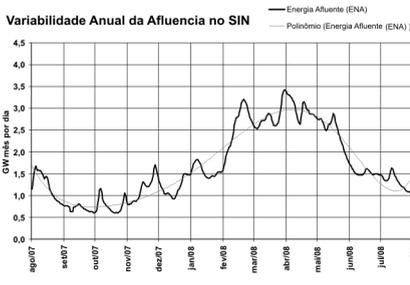


Figura 4 - Variabilidade anual da afluência hidráulica

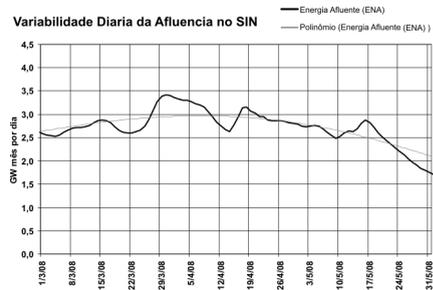


Figura 5 - Variabilidade diária da afluência hidráulica

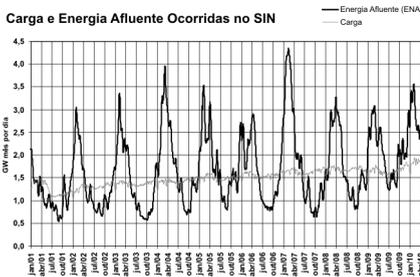


Figura 6 - Afluência de energia hidráulica total no SIN

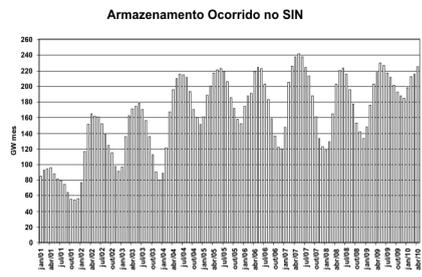


Figura 7 - Evolução da energia armazenada no total SIN

4.4. Elemento armazenador de energia

Para lidar com fontes de energia de grande variabilidade a introdução do conceito de “elemento armazenador de energia” ajuda na busca de soluções.

Assim, os reservatórios de armazenamento de energia hidráulica podem ser vistos de maneira mais genérica, como sendo um dispositivo armazenador de energia cujo elemento armazenador é a água, que também é usado como elemento gerador de energia

Para compensar a variabilidade da energia eólica não é possível atuar da mesma forma que no caso da energia hidráulica, usando o mesmo elemento, ou seja, a água, com armazenador e gerador de energia. Não há tecnologia para usar o vento como um elemento armazenador de energia, ou seja, não é possível armazenar vento nos períodos de abundância para compensar a falta dele nos períodos de carência.



Neste trabalho se vai usar a água e a associada energia armazenada nos reservatórios hidráulicos como elemento e dispositivo armazenador da energia eólica.

Esta nova função conceitual dos reservatórios e da água implica em sensíveis mudanças na maneira de projetar e operar as usinas hidráulicas e também de projetar e operar as fazendas eólicas:

Ou seja, as usinas hidráulicas, com os mesmos tamanhos de reservatórios hoje existentes, devem ser projetadas para serem muito mais motorizadas do que seriam se fossem construídas pelos critérios atuais. No novo critério, no limite, as usinas hidráulicas devem ser capazes de suprir a totalidade da potência da carga, como se não houvesse fazendas eólicas.

Os reservatórios atuais passam a ser muito mais bem utilizados se a sua utilização for medida em termos de energia da carga suprida dividida por hectômetro quadrado de área inundada. Com a mesma área inundada se pode suprir muito mais carga.

5. UM BANCO DE DADOS PARA A SIMULAÇÃO

Foi construído um banco de dados para simulação do SIN usando como fonte de informação o, [ONS (2010)], IPDO (Informativo Preliminar da Operação) disponibilizado diariamente pelo ONS desde janeiro de 2001 até a data atual.

6. O ALGORITMO DE SIMULAÇÃO

Foi construído um algoritmo de simulação de balanço de energia e de potência no SIN. Os pontos principais do balanço de energia são os seguintes:

- Os dados de energia (geração, carga e intercâmbios) são trabalhados em GW mês por dia;
- O SIN é representado por um único reservatório equivalente e o horizonte de simulação é sempre de 365 dias;
- A capacidade de armazenamento é sempre mantida constante igual a existente em 2007-2008;



- De um ano para outro a curva de aflúências hidráulicas se repete em formato, mas pode atrasar ou adiantar e pode aumentar o decrescer linearmente como um todo;
- As perdas no reservatório equivalente (evaporação) são estimadas através de um redutor linear médio anual;
- A meta de nível de armazenamento, ou é o nível que efetivamente ocorreu ou é um nível proveniente das simulações dos estudos plu-ri- anuais (em geral 5 anos a frente);
- O sistema é simulado dia a dia progressivamente no tempo. O nível de armazenamento NA no dia t+1 é dado por $NA(t+1) = NA(t) - \text{Balanço Energia}(t)$.

Os pontos principais do algoritmo de balanço de potência são os seguintes:

- Havendo disponibilidade de geração eólica, ela deve ser a primeira a ser alocada na curva de carga. A geração hidráulica deve ser complementar á geração eólica;
- Com a geração eólica, carga geração térmica e variação de nível de armazenamento se calcula um valor de geração hidráulica desejável;
- A geração hidráulica é limitada a um valor mínimo para considerar os limites de cavitação das turbinas, os limites de defluência das usinas hidráulicas e a capacidade de resposta as variações de carga e de geração eólica. Se a geração hidráulica desejável ficar abaixo deste mínimo, então a geração eólica disponível deve ser parcialmente desperdiçada;
- A reserva de potência é suposta como estando toda localizada nas usinas hidráulicas.

A utilização do algoritmo parte de condições pré estabelecidas, [ONS (2010), OLIVEIRA (2009)], da aflúência, do nível de armazenamento inicial e final, da geração térmica e do nível de geração eólica desejado. Busca-se então o nível de aumento de carga que, nestas condições, faz com que o reservatório equivalente seja deplecionado e volte a ser reenchido, completando um ciclo, sem atingir o nível máximo (vertimento) nem o nível mínimo (seca).



7. RESULTADOS PRELIMINARES

Muitos estudos, para diferentes condições de geração e carga no SIN, podem ser feitos usando esta técnica. Para exemplificar, neste item, são mostrados os resultados de dois estudos. Ambos os estudos pretendem mostrar o efeito de adicionar 140 GW no SIN simulando dia a dia no período 1 de agosto de 2007 a 31 de julho de 2008 (figura 8). Um estudo mostra a evolução de armazenamento do SIN (figura 9) e o balaço de potência (figura 10) considerando que todas as eólicas terão a mesma variabilidade. O outro estudo simula as eólicas divididas em 10 grupos geograficamente distantes, admitindo que as condições de vento de cada grupo de fazendas eólicas estão atrasadas de 1 dia em relação ao grupo anterior (figura 11).

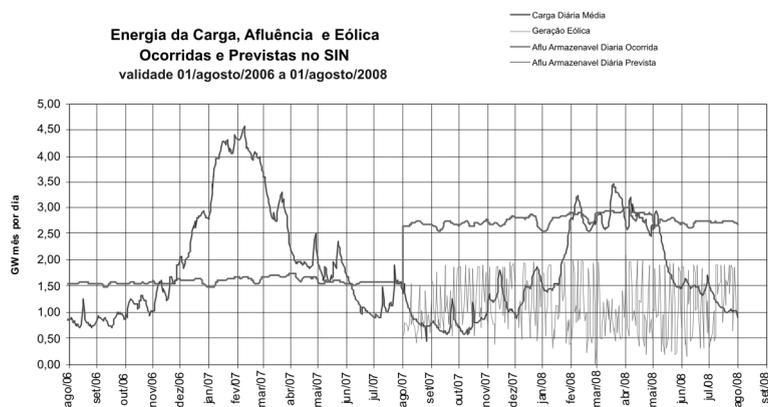


Figura 8 - Carga, afluência, e disponibilidade de geração eólica no período 08/2006 a 08/2008

Cada estudo se compõe de um balanço de energia e de um balanço de potência.

O balanço de energia dá como resultado as curvas sob o título "Tendências de Armazenamento no SIN" (figura 9). Duas curvas de armazenamento são mostradas. A curva intitulada "Armazenamento Ocorrido" mostra a evolução do armazenamento efetivamente ocorrida nesse período. A curva intitulada "Armazenamento com Eólica" mostra a evolução do armazenamento supondo que se instalasse 140 GW pico no SIN para condições de afluência hidráulica relativamente baixa ocorrida no período de agosto de 2007 a julho de 2008.



A quantidade de carga total que pode ser atendida instalando 140 GW no SIN é determinada variando iterativamente o seu valor até que em agosto de 2008, se consiga fazer com que a curva vermelha (simulação com 140 GW) se encontre com a curva preta (armazenamento ocorrido). Quando os dois níveis de armazenamento se igualam pode-se afirmar que o sistema hidráulico completou um ciclo de deplecionamento e re-enchimento chegando a um nível de armazenamento adequado para permitir que o ciclo se repita nos próximos anos.

Tendências de Armazenamento no SIN de 01/08/2007 a 31/07/2008 com de inserção de eólicas concentradas

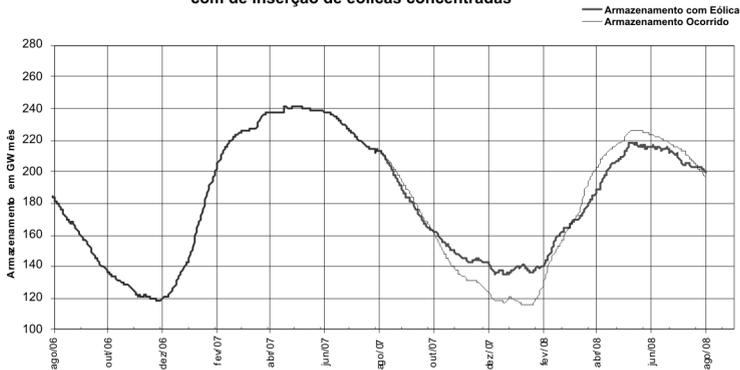


Figura 9 - Balanço de energia no período agosto de 2007 a agosto de 2008

O balanço de potência mostra evolução dia a dia da carga da geração hidráulica e da geração eólica. São apresentadas abaixo duas simulações uma para a condição eólica concentrada e outra para a condição eólica distribuída. A geração térmica é pequena e não é mostrada no gráfico.

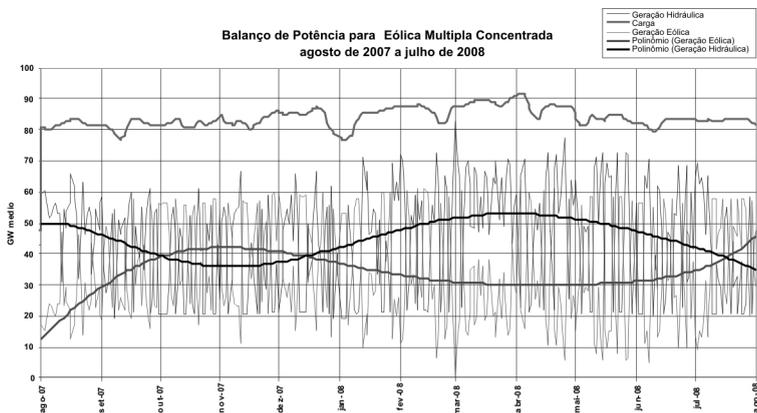


Figura 10 - Balanço de potência no período 08/2007 a 08/2008 com eólicas concentradas

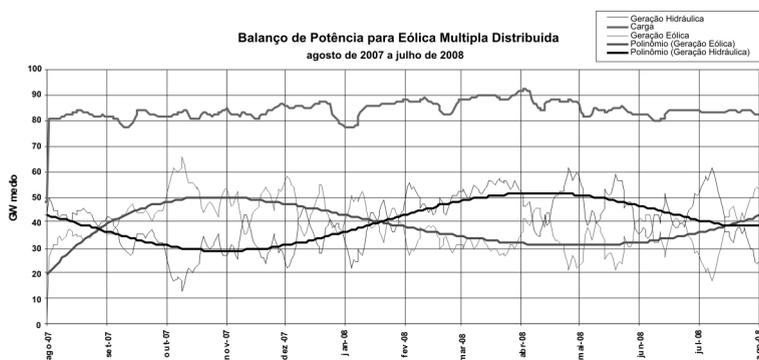


Figura 11 - Balanço de potência no período 08/2007 a 08/2008 com eólicas distribuídas

Analisando estes balanços (tabela 3) se encontra os seguintes resultados principais.

Tabela 3 - Comparação de resultados das simulações

	Atual	Com Eólica Concentrada	Com Eólica Distribuída
Capacidade de armazenamento	272 GW mês	272 GW mês	272 GW mês
Carga suprida	53 GW médios	92 GW médios	92 GW médios
Potencia eólica instalada	0,2 GW	140 GW	140 GW
Reserva de potência	7,5 GW	11 GW	11 GW
Potência hidráulica instalada	76 GW	100 GW	76 GW
Potencia térmica instalada	23 GW	23 GW	23 GW
Inserção Eólica	0 %	41 %	46 %

A constatação mais promissora é para o caso “geração eólica distribuída”:

- Implantado 140 GW de eólicas se obtém uma inserção eólica de 46%;
- Pode-se passar a suprir 92 GW médios de carga;
- Isto é feito sem ampliar a capacidade de armazenamento hidráulico e a potência instalada das usinas hidráulicas.



8. CONCLUSÕES

No limite da variabilidade da geração eólica, porque ela não é capaz de atender a carga com a continuidade necessária:

- Os reservatórios hidráulicos e os geradores eólicos podem ser assumidos como sendo principalmente fontes de energia (MW mês/dia);
- Os geradores hidráulicos podem ser assumidos como sendo principalmente fontes de potência instantânea (MW);
- Geradores hidráulicos são adequados porque podem ser ligados e desligados em poucos minutos e assumem carga com velocidade compatível com a variabilidade das eólicas;
- Uma RESERVA DE POTÊNCIA hidráulica é necessária para suprir a carga nos períodos em que a potência eólica não estiver disponível, tornando a variabilidade das eólicas transparente para o consumidor, garantindo assim a CONTINUIDADE do suprimento;
- Sistemas de controle deverão ser adaptados para prover uma transição suave da geração eólica para a geração hidráulica e de volta para a geração eólica.

Assim, instalando eólicas em larga escala, então com a capacidade já existente de armazenamento de energia nos reservatórios hidráulicos atuais, se poderá suprir uma carga total de energia muito maior do que atualmente. Será necessário apenas instalar mais potência (mais geradores) nas mesmas usinas hidráulicas e ou construir novas usinas hidráulicas com grandes motorizações e reservatórios muito pequenos. E o desafio tecnológico é o de minimizar os efeitos da variabilidade eólica, tornando-a transparente para a carga.

A decisão de usar os reservatórios das usinas hidráulicas como dispositivo armazenador de energia eólica tem que ser tomada com um planejamento feito com grande antecedência.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ackermann, T. – Wind Power in Power Systems – Livro – 2008

Creseb; Cepel - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - <http://www.cresesb.cepel.br/> acessado em 2010

Custódio, R.S. - Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica, - Livro – 2009

DWIA (Danish Wind Industry Association): Guided Tour <http://guidedtour.windpower.org/en/tour/wres/index.htm> - acessado em 2010

Enercon GmbH: http://www.enercon.de/en/_home.htm - acessado em 2010

Eólica Tecnologia: <http://www.eolica.com.br/home/index.php> - acessado em 2010

EWEA The European Wind Energy Association: <http://www.ewea.org/> - acessado em 2010

Fortunato, L.A.M., e outros, - Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica, - Livro – 1990

Kelman, J. – Metodologia de Cálculo da Energia Firme de Sistemas Hidrelétricos Levando em Consideração Usos Múltiplos da Água – ANA , Agência Nacional de Águas, correspondência interna de 3 novembro de 2002

Macieira, M.E.P; Terry, L.A.; et all – Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System – 14th PSCC Sevilla, 24 - 28 June 2002

MME – Plano Decenal de Expansão de Energia 2008 2017

Oliveira, F.S; Rigamonti R; Sampaio, L.L. e outros – Estudo Energético da Implantação de Usinas Eólicas na Oferta de Energia do Sistema Interligado Nacional, Complementaridade dos Regimes Hidrológico e Eólico – XX SNP-TEE – 2009

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico: <http://www.ons.org.br/publicacao/ipdo/> - acessado em 2010



Rosas P, "Dynamic Influences of Wind Power on the Power System" , Ørsted Institute and Technical University of Denmark., 2003, PhD thesis

Souza, Z; Santos, A.H.M; Bortoni E.C. – Centrais Hidrelétricas, Estudos para Implantação – Livro – 1999

Vestas: <http://www.vestas.com/en/> - acessado em 2010