

Geração hidrelétrica: fatos e mitos

Antonio Guilherme Garcia Lima

Doutor em Engenharia Elétrica.
Professor do Departamento de Engenharia Elétrica
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar um resumo sobre a questão energética da geração hidrelétrica, apresentando fatos para trazer mais razão e menos paixão às discussões sobre a geração de energia no Brasil. A geração hidrelétrica colocou o Brasil como o país com a matriz energética mais limpa dentre os 10 maiores produtores de eletricidade do mundo. Contudo, por ser uma fonte dependente da hidrologia, a hidroeletricidade carrega um risco intrínseco que não pode ser totalmente mitigado sem a utilização de outras fontes de energia. Do ponto de vista ambiental, energia eólica, solar e biomassa são as candidatas preferenciais para esta complementação, mas todas também possuem riscos semelhantes. Reservatórios maiores auxiliam na redução do risco, mas é indispensável a utilização de fontes de energia sem risco climático para garantir a segurança energética.

Palavras-Chave: Geração de Energia. Hidrelétricas. Hidrologia. Estatística.

Hydroelectric Power Generation: Facts and Myths

Abstract

The purpose of this paper is to present a short review of the hydropower generation to bring more reason and less passion to the energy generation business in Brazil. Hydropower generation was responsible to make Brazil the cleanest electricity generation country among the top 10 electricity generators in the world. However, hydropower generation has an intrinsic risk that cannot be fully mitigated without the use of other energy sources. From environmental point of view, wind power, solar and biomass are the best candidates to complement hydropower but they do also have similar risks. Therefore, the use of other energy sources, that do not have climate risks, is necessary to guarantee the energy security.

Keywords: Power Generation. Hydro Power Plants. Hydrology. Statistics.

1. Introdução

O carvão é a fonte primária de energia mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, seguido pelo gás natural e pela energia nuclear. Os combustíveis fósseis reunidos são responsáveis por 67% da eletricidade gerada no mundo, os combustíveis nucleares são responsáveis por 13% e as fontes renováveis são responsáveis por apenas 16%. Dentre as renováveis, a hidroeletricidade é a mais importante, com 13% do total de energia elétrica gerada.

O Brasil é o país com a matriz mais limpa dentre os dez maiores produtores de eletricidade no mundo, encontrando-se muito acima da média mundial. Ele possui 192 hidrelétricas¹ em operação comercial, totalizando 83.000 MW. Por outro lado, o país possui 1.744 termelétricas em operação, representando 29% do total instalado. Finalmente, o país possui 96 usinas eólicas em operação, responsáveis por 2.000 MW da potência instalada. Portanto, cerca de 90% da potência instalada no Brasil utiliza fontes renováveis de energia.

A Figura 1 mostra as principais bacias hidrográficas brasileiras e algumas hidrelétricas. As usinas representadas por um círculo são usinas a fio d'água e as representadas por um triângulo são usinas com capacidade de armazenamento.

2. Geração Hidrelétrica

A energia hidrelétrica baseia-se na energia potencial da água, dada pela expressão abaixo (equação 1):

$$E_p = \gamma \times V \times H$$

Onde E_p é a energia potencial da água [J]; H é a queda da água [m]; V é o volume de água [m³]; γ é o peso específico da água² [N/m³].

Figura 1 - Bacias Hidrográficas Brasileiras



Fonte: Mapa³ e Autor

A potência associada a esta energia é dada por (equação 2).

$$P = \gamma \times Q \times H$$

Onde P é a potência [W]; H é a altura da queda[m]; Q é a vazão [m³/s].

Na prática, a potência gerada pela usina será inferior ao valor acima devido ao rendimento dos equipamentos de conversão de energia, conforme mostra a equação 3. O fator de produtibilidade é definido como sendo a potência realmente gerada dividida pela vazão turbinada. Portanto, o fator de produtibilidade é um parâmetro único e característico de cada usina hidrelétrica:

$$E_e = k \times V_t$$

Onde V_t é o volume turbinado [m³]; E_e é a energia elétrica gerada [W]; k é o fator de produtibilidade da usina [W.s/m³].

2.1. Hidrologia Aplicada à Geração Hidrelétrica

O sol e a rotação da Terra criam um aquecimento desigual na superfície do planeta. O calor do sol provoca a evaporação de grandes volumes de água. A variação de temperatura do ar cria correntes que, aliadas à rotação da Terra, são responsáveis pelos ventos. Os ventos transportam o vapor d'água ao redor da terra. Este vapor se precipita, na forma de chuva ou neve, ao encontrar massas de ar frio.

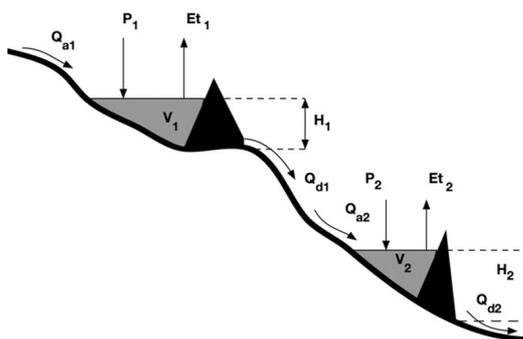
A chuva que cai em terra firme escoar pela superfície ou se infiltra no solo. O escoamento superficial segue em direção aos oceanos, formando rios e lagos. Somente 25% da precipitação global ocorre em terra firme e tem potencial de se tornar energia hidrelétrica.

A área geográfica onde toda precipitação escoar para um mesmo rio é chamada de bacia hidrográfica. A Figura 2 mostra o balanço hídrico em determinada usina hidrelétrica e a equação 4 representa matematicamente o mecanismo descrito acima:

$$\Delta V = P + Q_a - Q_d - Et$$

Onde ΔV é a variação do volume de água armazenada no reservatório; P é a precipitação no reservatório; Q_a é a vazão afluente no reservatório; Q_d é a vazão defluente no reservatório; Et é a evapotranspiração total na superfície do reservatório.

Figura 2 - Balanço Hídrico



Fonte: Autor

A precipitação e vazão afluente contribuem positivamente para o aumento da água armazenada na usina, aumentando a energia armazenada no reservatório. Ao contrário, a evapotranspiração representa uma perda de energia.

2.2. Vazão Natural Afluente

De acordo com a Figura 2, a vazão afluente de toda usina é afetada pela vazão defluente das usinas a montante⁴. Isto faz com que a série histórica das vazões afluentes perca consistência. Para contornar este problema, utiliza-se a vazão natural afluente. Esta vazão é definida como sendo a vazão afluente, em determinado ponto, sem a existência de nenhuma interferência humana a montante. Desta maneira, é possível analisar e comparar dados medidos ao longo do tempo.

A vazão natural afluente é uma série temporal, e seu espaço de amostragem é infinito, contínuo e positivo⁵.

A premissa básica na análise das séries temporais é sua estacionaridade. Séries temporais estacionárias se caracterizam por serem independentes da origem do tempo (MORETTIN; TOLOI; 2004). Aceitar a hipótese de estacionaridade da

vazão natural afluenta significa que o comportamento estatístico desta grandeza não se modifica nunca.

Do ponto de vista da geração de energia, desejamos que isto seja verdade, porque se pode estimar a geração futura com ferramentas estatísticas. A rejeição desta hipótese inviabiliza a previsão da geração, trazendo consequências práticas impensáveis para a geração hidrelétrica.

Matematicamente falando, a série temporal é estritamente estacionária quando todos os seus momentos estatísticos independem da origem do tempo. Como é inviável comprovar esta hipótese na prática, utiliza-se o conceito de série temporal fracamente estacionária ou estacionária de segunda ordem. Neste caso, o valor esperado, a variância e a covariância devem depender da origem do tempo, conforme a equação 5:

$$\{X_t\} = \{\dots, X_1, \dots, X_t, \dots\}$$

$$E[X_t] = \mu$$

$$Var(X_t) = \sigma^2$$

$$Cov(X_t, X_{t-j}) = \gamma_j$$

Onde $\{X_t\}$ é o espaço amostral da série temporal; X_t é a amostra da série temporal com origem de tempo t ; $E[X_t]$ é o valor esperado da amostra X_t ; $Var(X_t)$ é a variância da amostra X_t ; $Cov(X_t, X_{t-j})$ é a auto covariância entre amostras da série temporal com origens de tempo distantes de j ; μ é a média do espaço amostral; σ é o desvio padrão do espaço amostral; γ_t é a auto covariância do espaço amostral com defasagem de tempo j .

O valor esperado da energia elétrica gerada por um conjunto de usinas hidrelétricas será dado pelo somatório dos valores esperados das energias geradas por cada usina. Isto resulta na equação 6:

$$E\left[\sum E_{e_i}\right] = E\left[\sum k_i \times V_{ii}\right] = \sum k_i \times E[V_{ii}]$$

Onde $E[]$ é o valor esperado; E_{ei} é a energia elétrica gerada pela usina i ; k_i é a produtibilidade da usina i ; V_{ti} é o volume turbinado pela usina i .

Analogamente, a variância da energia elétrica gerada pelo mesmo conjunto de usinas será dada pela equação 7:

$$Var\left[\sum E_{ei}\right] = \sum k_i^2 \times Var[V_{ti}] + 2 \times \sum_{i \neq j} k_i \times k_j \times \rho[V_{ti}, V_{tj}] \times \sqrt{Var[V_{ti}] \times Var[V_{tj}]}$$

Portanto, dependendo do coeficiente de correlação⁶ (ρ), a variância da energia total gerada pelas usinas pode ser maior ou menor do que a soma das variâncias das usinas individuais.

Observa-se, na Tabela 1, que a maioria das usinas escolhidas apresenta correlação positiva e apenas Itaúba, localizada na Bacia do Atlântico Sul, apresenta correlação negativa. A explicação para esta constatação é que as bacias mais importantes nascem próximas na região do planalto central e, por isso, a correlação das precipitações correlacionadas provoca a correlação das vazões.

Tabela 1- Correlação das Vazões Afluentes Médias Mensais

Usinas	1	2	4	4	5	6	7	8	9	10
1 Belo Monte	1,00	0,39	-0,33	0,53	0,41	0,45	0,50	0,56	0,69	0,35
2 Furnas		1,00	-0,29	0,85	1,00	0,97	0,71	0,75	0,67	0,89
3 Itaúba			1,00	-0,38	-0,30	-0,29	-0,35	-0,39	-0,40	-0,33
4 Itumbiara				1,00	0,86	0,86	0,84	0,85	0,77	0,89
5 LC Barreto					1,00	0,98	0,71	0,75	0,68	0,89
6 Marimondo						1,00	0,71	0,75	0,71	0,86
7 Serra da Mesa							1,00	0,82	0,76	0,77
8 Sobradinho								1,00	0,74	0,81
9 Teles Pires									1,00	0,65
10 Três Marias										1,00

Fonte: Dados Vazões Mensais, Autor

A função de distribuição de probabilidade acumulada (FDPA) é definida como, segundo Forbes *et al.*(2011) como se segue (equação 8):

$$F(q) = \Pr[Q \leq q] = \int_{-\infty}^q f(u) \times du = \sum_{u \leq q} \Pr(u) = \alpha$$

A função FDPA é crescente e fornece a probabilidade α da vazão Q ser menor ou igual a q .

A função de sobrevivência é definida como sendo o complemento da FDPA da seguinte maneira (equação 9):

$$S(q) = \Pr[Q > q] = 1 - F(q)$$

A função densidade de probabilidade é definida como sendo (equação 10):

$$f(q) = \Pr[q - \Delta q < Q < Q + \Delta q] = \int_{q - \Delta q}^{q + \Delta q} f(x) \times d(x)$$

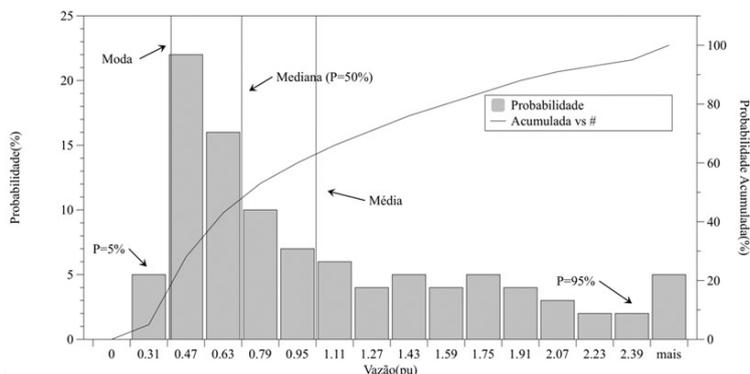
Para facilitar a comparação entre usinas, é conveniente normalizar a vazão e a base mais conveniente é a média da amostra dos dados medidos. Esta escolha baseia-se no Teorema do Limite Central, que demonstra que o valor esperado das amostras converge para a média do espaço amostral.

O histograma da vazão natural afluyente mensal média normalizada, Figura 3, mostra que a densidade de probabilidade das vazões não é simétrica em relação à média. Este comportamento é típico para grandezas com limite inferior e sem limite superior.

Observa-se que a moda, a mediana e a media são diferentes e isto caracteriza uma distribuição estatística assimétrica. A moda representa o valor com maior probabilidade de ocorrência⁷. A mediana representa a vazão com 50% de probabilidade de ocorrência e a média é a média aritmética da série de vazões. Estes três pontos estão relacionados pela equação 11:

$$moda = média + 3 \times (mediana - média)$$

Figura 3 - Histograma da Vazão Natural Afluente de Sobradinho



Fonte: Dados Vazões Mensais, Autor

O intervalo entre os pontos P_5 e P_{95} é uma medida de variabilidade da vazão e representa o intervalo de vazões com 90% de probabilidade de ocorrência. Quanto maior este intervalo, maior será a variância da vazão.

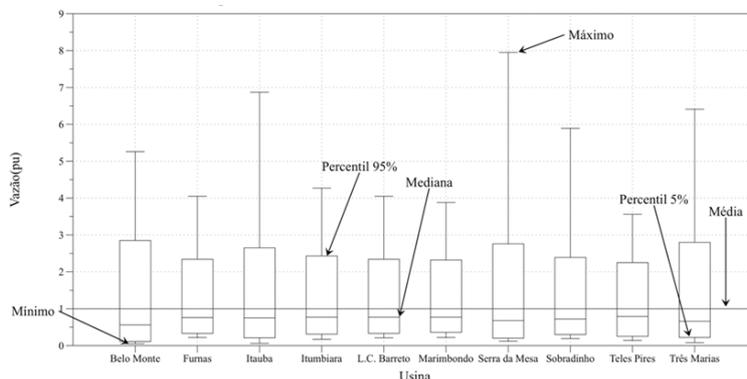
A Figura 4 apresenta os valores mínimos, P_5 , mediana, média, P_{95} e máximo das séries disponíveis de vazão natural afluente média mensal normalizada das usinas escolhidas⁸. Em virtude da normalização, a média de todas é sempre igual a 1 pu e podem ser comparadas lado a lado na mesma escala.

Observa-se que todas as usinas possuem medianas menores do que a média⁹. Portanto, é absolutamente normal que vazões e precipitações fiquem abaixo da média por mais de 50% do tempo.

2.3. Volume de Reservatório

Usinas hidrelétricas, salvo raríssimas exceções, precisam ter algum tipo de barragem para garantir pelo menos a queda d'água. Uma vez tendo a barragem, por menor que seja, passa a existir um reservatório. Considerando o reservatório inevitável, deve-se otimizá-lo do ponto de vista de geração de energia elétrica e do uso múltiplo da água.

Figura 4. Características da Usinas Brasileiras



Fonte: Vazões Mensais 1931-2011 e Autor

Usinas a fio d'água são usinas, com ou sem reservatório, que operam de tal forma que o nível de água na barragem e, conseqüentemente, o volume de água armazenada se mantêm constantes ao longo do tempo. Isto é feito através da regulação da vazão defluente. A partir da equação 4, podemos escrever que:

$$0 = P + Q_a - Q_d - Et \Rightarrow Q_d = P + Q_a - Et$$

Portanto, para manter o volume constante, a vazão defluente deve ser igual à vazão afluente mais a diferença entre precipitação e evapotranspiração.

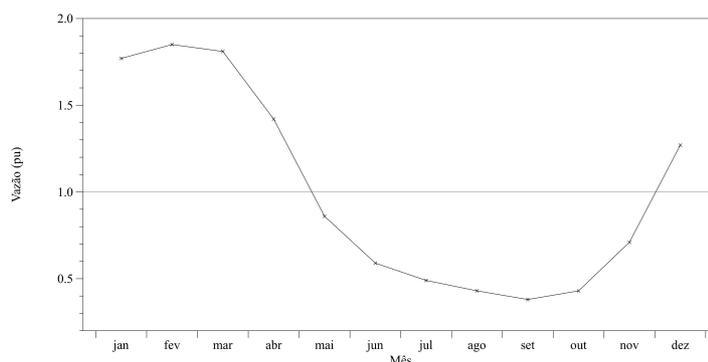
Itaipu, Belo Monte, Jirau, Santo Antonio, Teles Pires são exemplos de usinas a fio d'água, apesar de seus imensos reservatórios. Por outro lado, Sobradinho, Três Marias e Serra da Mesa são exemplos de usinas com capacidade de armazenamento.

A Figura 5 apresenta a média mensal da vazão natural afluente de Sobradinho. Observa-se que as médias mensais da vazão natural afluente não convergem para um mesmo valor. Isto significa que a série temporal das médias mensais da vazão natural afluente não é estacionária.

A área abaixo da média é a capacidade de armazenamento médio necessária para a

regularização da vazão anual e, neste caso, equivale a 21,8 km³. De acordo com a Tabela 2, o volume útil de Sobradinho (28,7 km³) é 32% superior ao valor calculado para regulação na média. Contudo, o volume útil representa apenas 34% do volume médio anual da vazão natural afluyente¹⁰. De acordo com a Tabela 2, Serra da Mesa é a usina com maior capacidade de armazenamento e é a única com volume útil superior ao volume afluyente médio anual.

Figura 5 - Variação da Vazão Natural Afluyente Média Mensal



Fonte: Vazões Mensais 1931-2011 e Autor

Tabela 2 – Dados das Usinas

Usina	Número Máquinas	Potência Unitária (MW)	Produtibilidade @ 65% VU (MW/(m ³ /s))	Volume Útil (km ³)	Vazão ¹¹ Turbina (m ³ /s)
Itaúba	4	125	0,8259	0	151
Três Marias	6	66	0,4301	15,3	153
Sobradinho	6	175	0,241	28,7	726
LC Barreto	6	184	0,5627	0	327
Furnas	8	164	0,7726	17,2	212
Serra da Mesa	3	425	1,0315	43,3	412
Belo Monte	18	611	0,8022	0	762
Itumbiara	6	380	0,6813	12,5	558
Marimbondo	8	186	0,4939	5,3	377
Teles Pires	5	364	0,4814	0	756

Fonte: ONS¹²

Portanto, usinas com reservatório e com volume útil zero possuem capacidade de compensar apenas as variações de vazão afluentes horárias e diárias. As usinas com reservatório e volume útil inferior a 1 pu permitem regulação sazonal e as usinas com volume útil maior do que 1 pu permitem a regulação plurianual.

2.4. Análise da Energia

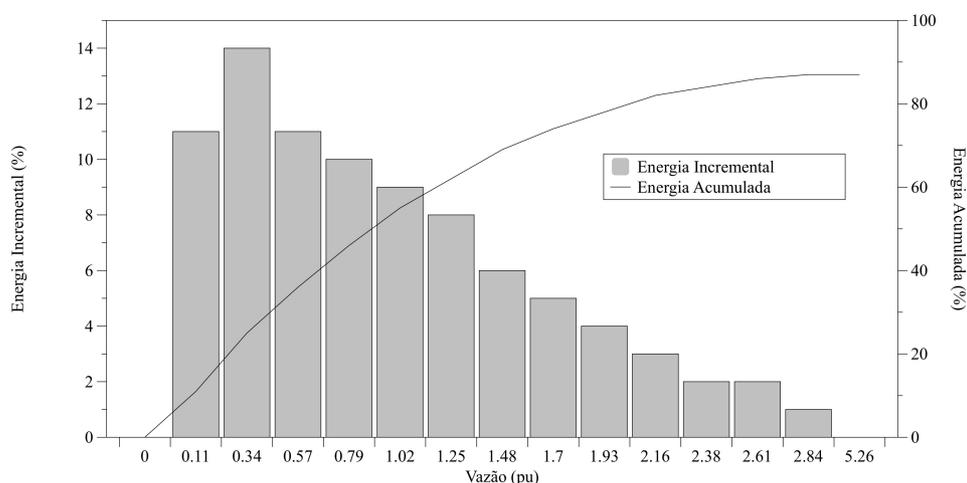
A energia elétrica, possível de ser gerada em usinas a fio d'água, pode ser escrita, a partir da equação 3, da seguinte maneira¹³:

$$E_e = k \times V_t = k \times \sum_n S(q_n) \times \Delta q_n$$

Onde k é o fator de produtibilidade; q_n é a vazão n; $S(q_n)$ é a função de sobrevivência da vazão n; Δq_n é a variação de vazão entre n e n-1.

A Figura 6 apresenta a distribuição de energia de Belo Monte, calculada a partir da equação 13. Observa-se que a energia incremental aumenta, atinge um máximo e diminui em decorrência da distribuição de probabilidade da vazão.

Figura 6 - Distribuição de Energia



Fonte: Vazões Mensais 1931-2011 e Autor

2.5. Energia Armazenada

Considerando duas usinas em operação, a energia armazenada, de acordo com a Figura 2, será dada por:

$$E_a = (k_1 + k_2) \times Vu_1 + k_2 \times Vu_2 = \sum_i \left(\sum_j k_j \right) \times Vu_i$$

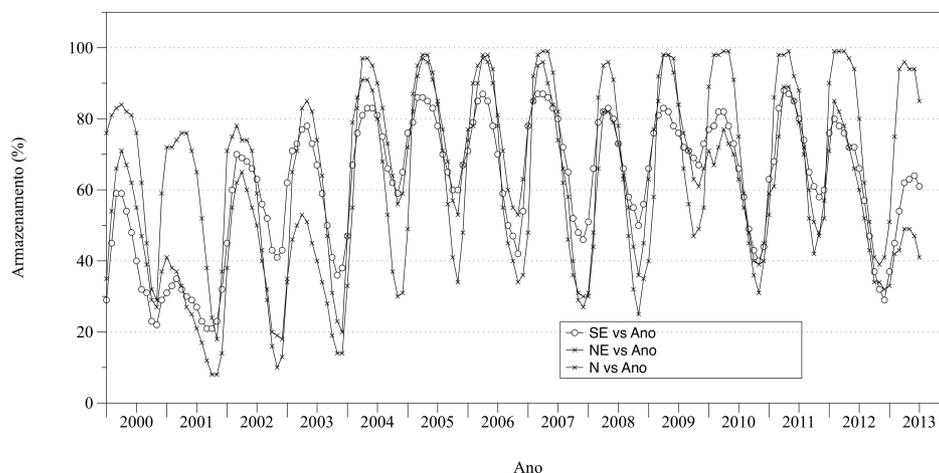
Onde: E_a é a energia armazenada total nas usinas; k_i é o fator de produtibilidade da usina i ; Vu_i é o volume útil armazenado na usina i ; j são as usinas a jusante de i .

Generalizando, o volume armazenado em determinada usina é ponderado pelo somatório da produtibilidade das usinas a jusante no cálculo da energia total armazenada. Portanto, usinas a fio d'água contribuem para a energia total armazenada no sistema desde que existam usinas com reservatório a montante.

As usinas de Belo Monte, Santo Antonio e Jirau são exemplos interessantes. Atualmente, elas são usinas a fio d'água e não existem usinas com capacidade de armazenamento a montante. Portanto, elas não contribuem para a energia armazenada no sistema. Contudo, quando se construir a primeira usina a montante com capacidade de armazenamento, elas passarão a contribuir para a energia armazenada.

A título de exemplo, a Figura 7 apresenta a energia armazenada equivalente dos sistemas SE/CO, NE e N nos últimos 14 anos¹⁴.

Figura 7 - Energia Armazenada Equivalente nos Reservatórios



Fonte: ONS¹⁵ e Autor

Observa-se que estes três sistemas são extremamente correlacionados. Apesar do sistema S não estar na figura, ele apresenta correlação negativa conforme mostra a Tabela 1.

Além disso, observa-se que, após o racionamento em 2001, quando a energia armazenada atingiu seu mínimo histórico, os subsistemas SE/CO e NE nunca mais voltaram a encher completamente.

Idealmente, em situação de equilíbrio, o sistema hidrelétrico deveria atingir o máximo de armazenamento todos os anos e o mínimo deveria variar em função de flutuações plurianuais.

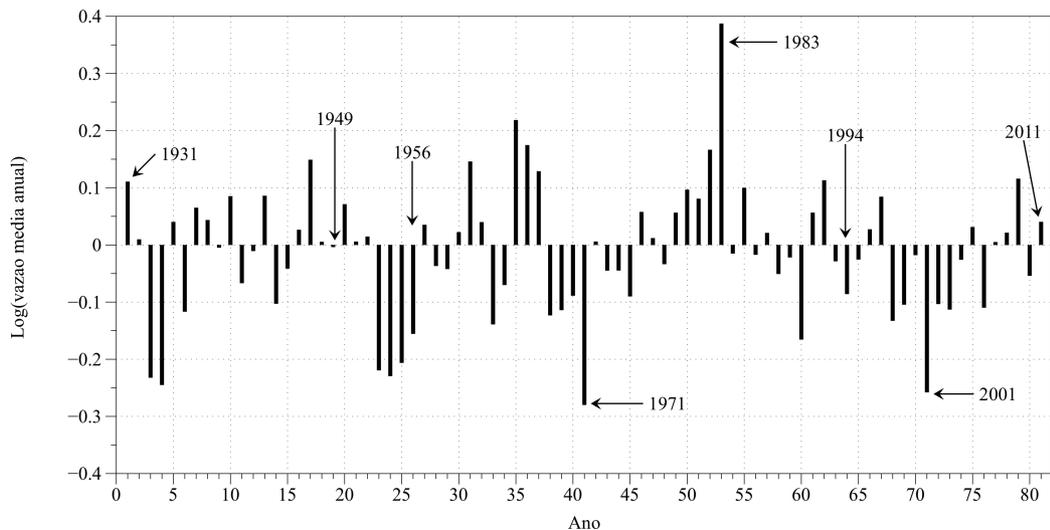
De acordo com o ONS¹⁶, a capacidade de armazenamento da região SE/CO é de 202.000 MW_{mês}, e representa 70% da capacidade de armazenamento de todo o sistema. Portanto, o déficit de energia neste subsistema é da ordem de 20.000 MW_{mês}, que corresponde a 10% da sua capacidade máxima de armazenamento e é exatamente a capacidade instalada de termelétricas.

2.6. Análise das Vazões Médias Anuais

Conforme visto anteriormente, o ciclo hidrológico é anual e os reservatórios possuem capacidade de armazenamento para amortecer as variações mensais e, eventualmente, anuais. Uma maneira de filtrar a sazonalidade anual é considerar a série temporal das médias anuais da vazão normalizada. Além disso, para eliminar a assimetria, consideramos o logaritmo¹⁷ desta série, e esta nova série temporal passa a ser fracamente estacionária com distribuição normal. Estas características permitem a utilização de ferramentas estatísticas mais elaboradas.

A Figura 8 apresenta esta nova série referente à usina de Furnas. Observa-se que a vazão natural afluyente média anual de Furnas esteve abaixo da média em 6 dos 10 anos de 2001 a 2011, e a média desses 10 anos ficou 7% abaixo da média. Esta constatação talvez explique, pelo menos em parte, o fato de os reservatórios não terem mais enchido completamente após 2001.

Figura 8 - Log da Vazão Média Anual Normalizada



Fonte: Vazões Mensais 1931-2011 e Autor

A análise estatística¹⁸ mais detalhada desta série forneceu o modelo autorregressivo de primeira ordem, apresentado na equação 15:

$$\log[Q_{na,t}] = A_1 + A_2 \times \log[Q_{na,t-1}] + N(0, Var)_t$$

Onde: Q_{nat} é a vazão natural afluyente anual média no ano t; Q_{nat-1} é a vazão natural afluyente anual média no ano t-1; A_1 e A_2 são constantes obtidas da análise estatística; $N(0, Var)_t$ é o ruído estatístico com distribuição normal de média 0 no ano t; Var é a variância do ruído estatístico.

Apesar deste modelo ter sido ajustado para a usina de Furnas, ele pode ser generalizado para todas as usinas. O coeficiente A_1 é diferente de zero, apesar da média das vazões normalizadas ser igual a 1, porque a média de logaritmos é diferente do logaritmo da média. Portanto, ele não tem nenhum significado físico no modelo, mas precisa ser matematicamente considerado. Porém, o coeficiente A_2 representa o acoplamento entre as vazões de determinado ano com o ano anterior¹⁹. Fisicamente, as vazões médias anuais são independentes dos anos anteriores. Isto significa que, a cada estação de chuvas, o passado é esquecido e a energia enviada pela natureza é aleatória, podendo ser aproximada por uma distribuição normal. Contudo, o período de chuvas, apesar de ser anual, não segue o calendário civil. Portanto, o coeficiente A_1 é diferente de zero para ajustar estas diferenças de calendário, varia entre -1 e 1 e depende da usina específica.

2.7. Energia Firme

De acordo com o Manual de Inventário (Cepel, 2007), a energia firme de uma usina hidrelétrica é dada pela equação 16:

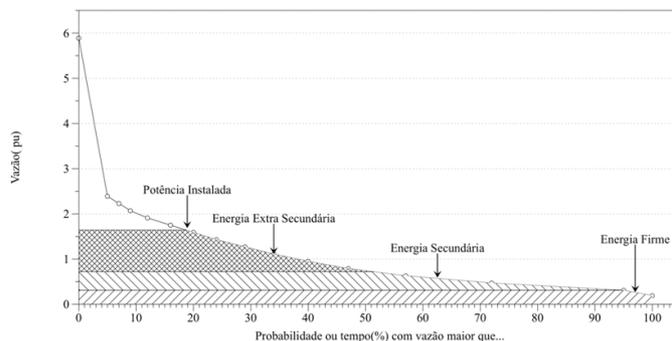
$$E_f = 0,0088 \times H_m \times Q_m$$

Onde E_f é a energia firme [Mw_m]; H_m é a queda líquida média [m]; Q_m é vazão líquida média no período crítico do aproveitamento [m^3/s].

A Figura 9 apresenta a curva de persistência das vazões afluentes normalizadas da usina de Sobradinho. A persistência é a função inversa da função sobrevivência e fornece a vazão com probabilidade de duração superior a determinado valor. Nesta curva foram assinaladas a energia firme da usina, a energia secundária, a energia extra secundária e a potência instalada.

Observa-se que, pelo menos neste caso, a energia firme, a energia secundária e a energia extra secundária são da mesma ordem de grandeza²⁰. A energia secundária pode ser transformada em energia firme através dos reservatórios. Não por acaso, ela é definida como sendo a energia possível de ser gerada entre a vazão mediana e a vazão P_5 . Ao dimensionar o reservatório desta maneira, estaríamos dobrando a energia firme desta usina. Outra forma de aproveitar a energia secundária seria através da complementaridade de usinas. Contudo, conforme a Tabela 1, como a maioria das usinas hidrelétricas brasileiras apresenta correlação positiva, esta solução não é eficiente. Finalmente, para aproveitar a energia extra secundária, a solução são usinas movidas por fontes de energia com disponibilidade determinística e com flexibilidade de operação, uma vez que operarão menos de 50% do tempo na média. Infelizmente, nenhuma fonte renovável disponível atualmente no país possui esta característica.

Figura 9 - Curva de Persistência da Vazão e a Energia Firme



Fonte: Vazões Mensais 1931-2011 e Autor

3. Conclusões

A geração hidrelétrica é responsável pelo Brasil possuir a geração de energia mais limpa dentre os 10 maiores produtores de eletricidade no mundo. Contudo, o preço disso é a certeza/risco de 5% de racionamento. Além disso, os novos reservatórios das hidrelétricas estão cada vez menores e a geração térmica foi execrada. A manutenção desta política nos levará ao futuro “limpo e escuro”.

Por outro lado, o argumento do risco não deve ser utilizado para viabilizar toda e qualquer geração. Precisamos perseguir a segurança energética com menores custos financeiros e ambientais. A questão ambiental é séria e precisa estar nos corações e mentes de todos.

O primeiro passo é melhorar a utilização dos reservatórios existentes. A mudança na forma de operar as usinas a fio d’água, que possuem reservatórios, permite transformar parte da energia secundária existente em energia firme sem nenhum custo adicional.

O segundo passo é aproveitar a energia extra secundária. Para isso, basta criar um conjunto de termelétricas otimizadas para operar menos de 50% do tempo. Mais uma vez, parte desta ação pode ser executada imediatamente sem investimento adicional. Basta mudar o despacho atual das térmicas existentes.

Finalmente, o terceiro passo é integrar o planejamento hidrotérmico para garantir a expansão ótima das futuras usinas térmicas e hidrelétricas. Atualmente, o planejamento das hidrelétricas é feito independentemente das térmicas. Contudo, planejar as novas hidrelétricas com a maior capacidade de armazenamento possível conjuntamente com novas térmicas otimizadas para aproveitar ao máximo a energia extra secundária permitiria otimizar o sistema com o mínimo de impacto ambiental e econômico.

4. Referências

Boletim de Carga Mensal –n.7, julho 2013, ONS.

FORBES, C., EVANS, M., HASTINGS, N., PEACOCK, B., **Statistical Distributions**, 4ª Edição, New Jersey, Wiley, 2011.

KEY WORLD ENERGY STATISTICS, Paris, International Energy Agency, 2012, disponível em : < HYPERLINK "<http://www.iea.org/>"<http://www.iea.org/>>.

MORETTIN, P.A., TOLOI, C.M.C., **Análise de Séries Temporais**, 1ª Edição, São Paulo, Edgar Blücher, 2004.

MME, Cepel, **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas**, Edição 2007, Rio de Janeiro, E-papers, 2007.

Vazões Mensais 1931-2011, Rio de Janeiro, Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, 2013, disponível em: < http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx>.

5. Notas

¹ Com mais de 30 MW de potência instalada. Dados Aneel disponíveis em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15&idPerfil=2&idiomaAtual=0>>
² $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$

³

<http://3.bp.blogspot.com/QIHW1G7cASI/TIdcA63q1xI/AAAAAAAAABow/0cU9w4pePqI/s400/MAPA%2BDAS%2BBACIAS.png>

⁴ Isto também é válido para todo uso da água a montante.

⁵ Não há vazão negativa.

⁶ O fator de correlação é adimensional e varia entre -1 e 1.

⁷ Ponto da curva de distribuição de probabilidade com derivada zero.

⁸ A Moda não foi incluída porque está relacionada com a mediana e a média através da equação 11.

⁹ Este resultado era esperado em virtude da vazão ser maior que zero e implica em assimetria positiva.

¹⁰ $2662 \text{ (m}^3/\text{s)} \cdot 8760 \text{ (h/ano)} \cdot 3600 \text{ (s/h)} = 83,95 \text{ km}^3/\text{ano}$

¹¹ Calculado a partir da Potência Unitária e do Fator de Produtibilidade.

¹² Plano Anual da Operação Energética –PEN 2012- Volume II, Rio de Janeiro, ONS, 2013, disponível em :<<http://www.ons.org.br>> baixado em 22/8/2013.

¹³ O somatório é a integral discreta da vazão.

¹⁴ A energia armazenada equivalente também é uma série temporal.

¹⁵ disponível em < http://www.ons.org.br/historico/energia_armazenada.aspx>

¹⁶ Informativo Preliminar Diário da Operação, 1/9/2013, ONS, disponível em <http://www.ons.org.br/resultados_operacao/ipdo.aspx>

¹⁷ Estas séries temporais podem ser aproximadas por distribuições lognormais.

¹⁸ Utilizou-se o pacote Rstudio Versão 0.97.551

¹⁹ Na verdade, testou-se um modelo autorregressivo integrado de média móvel –ARIMA-, e este foi o melhor resultado.

²⁰ As áreas debaixo das curvas são praticamente iguais.

Recebido em 30 de setembro de 2013.

Aprovado em 08 de novembro de 2013.