

## **ANÁLISE DAS SÉRIES SINTÉTICAS DE ENERGIA NATURAL AFLUENTE BRUTA DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

**Silvia Regina dos Santos Gonçalves**

PósMQI - Programa de Pós-graduação em Metrologia, PUC-Rio  
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - 22451-900  
[sgoncalves@aluno.puc-rio.br](mailto:sgoncalves@aluno.puc-rio.br)

**Rodrigo Flora Calili**

PósMQI - Programa de Pós-graduação em Metrologia, PUC-Rio  
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - 22451-900  
[rcalili@esp.puc-rio.br](mailto:rcalili@esp.puc-rio.br)

### **RESUMO**

O planejamento energético brasileiro tem enfrentado constantes desafios para garantir o suprimento de energia nas diversas regiões do país. Nos últimos anos observou-se uma redução significativa da afluência, em especial, na região Nordeste. Os sucessivos períodos de seca têm impactado a simulação dos modelos energéticos formadores do preço da energia. No entanto, estudos têm levantado outras causas para os desvios encontrados no planejamento quando comparado com os dados realizados. Utilizando geração de séries sintéticas através do modelo PAR(p) e fazendo uma análise destas pode-se inferir que há uma alta probabilidade de existir uma sobre-estimação de energia na região Nordeste. Este problema dos modelos provoca um grande descolamento da realidade, além de outros equívocos de planejamento, como os atrasos da expansão dos parques geradores e a falta de investimentos na transmissão de energia entre as regiões.

**PALAVRAS CHAVE. Planejamento energético, Séries sintéticas de energia, Energia natural afluyente.**

**Área Principal (EN – PO na Área de Energia)**

### **ABSTRACT**

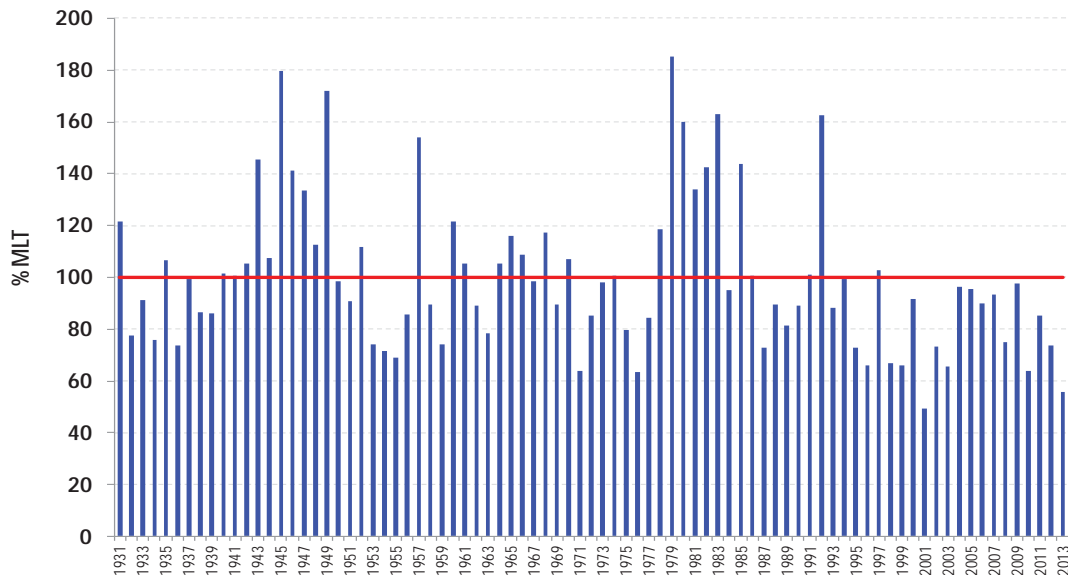
The Brazilian energy planning has faced constant challenges to ensure the power supply in different regions of the country. In recent years there has been a significant reduction in affluence, especially in the Northeast. Successive droughts have impacted the simulation energy models trainers in energy prices. However, studies have raised other causes for the variances found in the planning when compared with the effected data. Using generation of synthetic series through the PAR (p) model and analyzing these series, it can be inferred there is a high probability that of overestimation of energy in the Northeast. This problem in the models cause a large deviation from reality, as well as other planning mistakes such as delays in expanding generators parks and the lack of investment in the transmission of energy between regions.

**KEYWORDS. Energy planning, Synthetic power series, Affluent natural energy**

**Main area (EN – PO in the Energy Area)**

## 1. Introdução

Nos últimos anos observou-se uma redução significativa das aflúências, e consequentemente, da Energia Natural Afluente - ENA<sup>1</sup>, da região nordeste do Brasil quando comparada a Média de Longo Termo – MLT<sup>2</sup>, definida com base no histórico de vazões, conforme mostra a figura 1 abaixo.



**Fig. 1. Percentual da MLT – média anual da região nordeste (ONS, 2014)**

O setor elétrico brasileiro passou por transformações importantes ao longo dos anos a fim de aprimorar o planejamento da operação energética.

A partir dos anos 80 o sistema brasileiro se consolida com grandes usinas. É proposta então a abordagem probabilística através da metodologia da Programação Dinâmica Estocástica – PDE. O objetivo dessa abordagem é definir a decisão que corresponda ao menor custo esperado futuro para cada estado do reservatório.

A PDE era utilizada para calcular a estratégia de cada subsistema. Com a necessidade de representar os intercâmbios entre as regiões, a PDE deparou-se com a “maldição” da dimensionalidade, ou seja, os estados a serem considerados na otimização crescem exponencialmente para cada incremento de reservatório (Maceira, 1989).

No final da década de 90 foi concebida uma metodologia que contornava a restrição observada na PDE. A nova metodologia foi denominada de Programação Dinâmica Dual

<sup>1</sup> Energia que pode ser produzida a partir das vazões naturais afluentes aos reservatórios. Os valores são expressos em MW médios ou em percentual da média histórica de longo termo, MLT.

<sup>2</sup> A partir do histórico de vazões, o Operador Nacional do Sistema – ONS – gera uma média de ENA para cada mês. Esse valor passa a representar a média de longo prazo para o ano vigente.

Estocástica – PDDE – e possibilitou representar as interligações do Sistema Interligado Nacional, através do modelo Newave<sup>3</sup> (Kligerman, 1992).

A modelagem no Newave passa a considerar uma árvore de cenários reduzida, representando poucos estados de armazenamento.

O Newave é o modelo oficial utilizado para definir mensalmente a estratégia da operação energética de longo prazo que serão consultadas pelo modelo de curto prazo (Decomp<sup>4</sup>) para o estabelecimento do preço spot da energia.

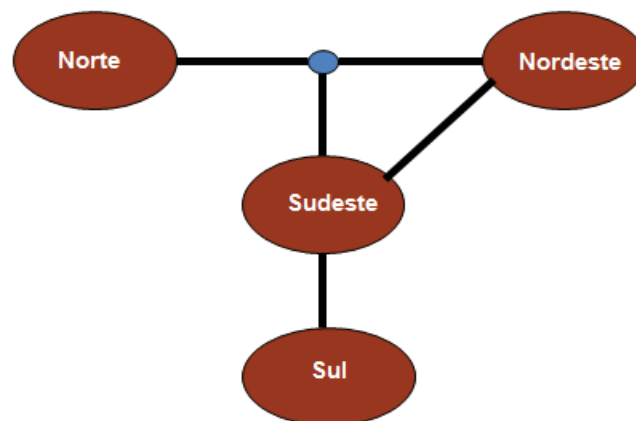
O modelo Newave é composto por quatro sub-módulos (CEPEL, 2012):

- ✓ Cálculo do sistema equivalente;
- ✓ Energias afluentes;
- ✓ Cálculo da política de operação hidrotérmica;
- ✓ Simulação da operação.

O módulo de cálculo do sistema equivalente define os subsistemas equivalentes de energia através do somatório da Energia Armazenada, Energia Controlável e Energia a Fio d'água.

Cada subsistema equivalente terá então um Reservatório Equivalente de Energia, uma série de Energias Controláveis para 65% do volume útil e uma série de Energia a Fio d'água Bruta e Fio d'água Líquida.

É apresentado na figura 2 o esquemático dos subsistemas equivalentes interligados.



**Fig. 2. Esquemático dos subsistemas equivalentes do Brasil**

O módulo de energias afluentes estima os parâmetros estocásticos e é responsável por gerar as séries sintéticas de energias afluentes, através do modelo auto-regressivo periódico –

<sup>3</sup> Programa computacional utilizado no planejamento mensal da operação para um horizonte de 5 anos. A metodologia do programa é baseada em um modelo matemático que visa determinar a melhor política de geração (*mix* entre geração hidráulica e térmica) minimizando o custo total da operação do sistema para todo o período de planejamento.

<sup>4</sup> Programa Computacional utilizado a partir dos resultados do NEWAVE para um horizonte de até 2 meses. O Custo Marginal de Operação (CMO), no qual o PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) se baseia, é resultado da utilização do DECOMP que gera os valores em base semanal por patamar de carga.

PAR(p)<sup>5</sup>, que serão utilizadas no cálculo da política de operação hidrotérmica e na simulação da operação.

No módulo de cálculo de operação hidrotérmica se determina a operação de menor custo para os subsistemas, através da metodologia PDDE.

Já no módulo de simulação da operação são considerados distintos cenários hidrológicos, variações de demandas e desempenho dos elementos operativos, resultando nos custos marginais de operação, risco de déficit, montante de geração hidráulica e térmica, montante de intercâmbios e demais saídas do modelo.

Dentre as informações apresentadas sobre o modelo Newave, os principais dados de entrada considerados pela simulação/otimização são as séries de vazões afluentes que definem a Energia Natural Afluente dos reservatórios. Logo, um dos principais elementos da política de operação, a ENA, é sensível às condições climáticas, tornando a operação energética mais complexa, uma vez que precisa otimizar os recursos hídricos e térmicos no tempo.

O problema de operação ótima de um sistema hidrotérmico consiste em determinar uma estratégia de operação que a cada estágio do período de planejamento, conhecido o estado do sistema no início do estágio, forneça as metas de geração de cada unidade geradora. Esta estratégia deve minimizar o valor esperado do custo de operação ao longo do período, composto de custos de combustível somados a penalizações por eventuais falhas no atendimento de energia.

O problema de operação e o recorrente comportamento da curva de energia natural afluente da região Nordeste nos últimos anos fomentaram as análises propostas no presente estudo.

Existem dois aspectos que se destacam nessas análises. O primeiro é a forte volatilidade das vazões geradas para o mesmo período quando das atualizações das condições iniciais, como o armazenamento dos reservatórios, ENA verificada, cronograma de expansão da oferta, indisponibilidades programadas e demais aspectos da operação. Já o segundo não tem correlação com as condições iniciais. Trata-se da anomalia das vazões registradas ao longo dos anos significativamente inferiores a média histórica.

A região nordeste do Brasil tem passado por períodos longos de estiagem de chuva, ocasionando impacto direto para a sociedade local e interferindo na otimização energética do SIN, Sistema Interligado Nacional. A estiagem de chuva provoca o fenômeno conhecido como “seca” que pode ser dividida em três tipos: meteorológica, agrícola e hidrológica.

A seca meteorológica ocorre em um período de meses a anos e é caracterizada pela precipitação abaixo da média normal climatológica. É causada por anomalias persistentes como os sistemas de alta pressão atmosférica, oriundos da anomalia de temperatura da superfície do mar (TSM) ou por outras condições remotas. Cabe destacar que condições específicas, como baixa evaporação e umidade associada a solos secos e temperaturas altas, aumentam as anomalias atmosféricas (CGEE, 2012).

A seca agrícola corresponde a um período em que os solos ficam secos, como resultado de precipitação abaixo da média ou de eventos de chuva intensa, mas menos frequentes, com

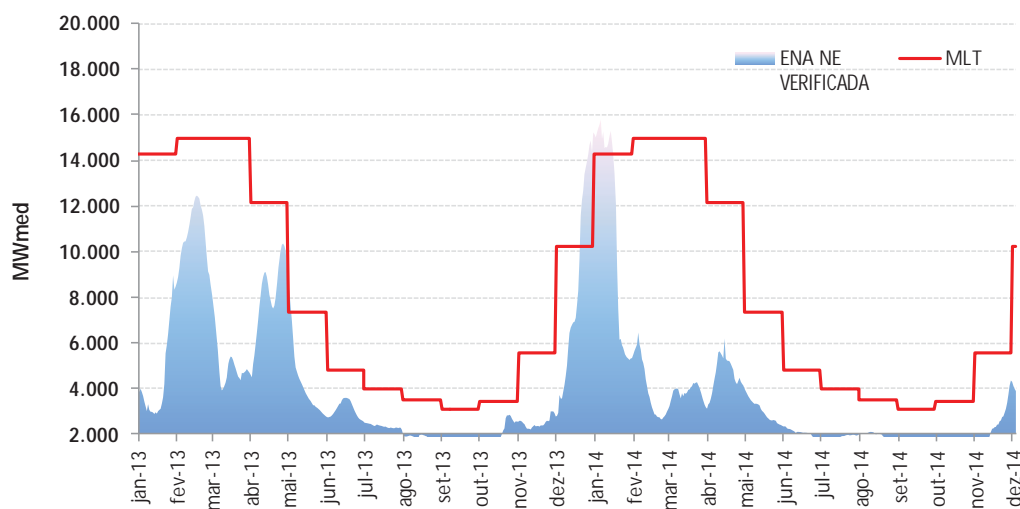
---

<sup>5</sup> O modelo auto-regressivo periódico da família Box & Jenkins, PAR (p), é empregado na modelagem das séries de vazões hidrológicas e/ou de energias naturais afluentes utilizadas no planejamento da operação energética no Brasil pelo modelo Newave.

evaporação acima do normal. Como consequências dessa seca destacam-se a redução da produção das lavouras e diminuição do crescimento das plantas (CGEE, 2012).

Já a seca hidrológica ocorre quando a vazão dos rios e o armazenamento de água em aquíferos, lagos ou reservatórios caem abaixo dos níveis médios a longo prazo. Esse tipo de seca se desenvolve mais lentamente, pois está diretamente relacionada com a água armazenada nos reservatórios. A falta de precipitação é um dos vilões que alimentam a seca, porém a má gestão dos recursos hídricos e a erosão dos solos tem participação na construção desse cenário (CGEE, 2012).

Na figura 3, é apresentada a Energia Natural Afluyente – ENA – verificada da região Nordeste no período janeiro/13 a dezembro/14, considerado um período crítico observado nos últimos anos. Os dados apurados estão discretizados de forma diária e comparados à média de longo termo – MLT – da região de cada mês. Observa-se que nesse período a média só foi atingida em janeiro de 2014, indicando que os valores realizados de ENA para a região estão significativamente abaixo da média durante todo o período analisado.



**Fig. 3. ENA diária da região nordeste (jan/13 a dez/14) – MWmed (Fonte: ONS)**

Como a ENA verificada tem se realizado sistematicamente abaixo dos valores médios e o modelo de otimização energética, Newave, tende a média histórica, isso significa dizer que a política de geração, realizada pelo modelo, não representa o cenário energético atual, o que impacta diretamente na dinâmica da geração do SIN e na formação do preço da energia.

Administrar o uso da água em regiões de seca torna-se um desafio para o planejamento energético. São necessárias políticas energéticas imediatas para identificação do problema e criação de mecanismos para o suprimento de energia e abastecimento de água na região.

No entanto, a identificação do problema exposto deve ser precedida de uma análise detalhada do conjunto de parâmetros associados à temática. Não se pode limitar a discussão ao problema específico da seca observada. Há também outro fator importante que é a sobre-estimação da ENA nos modelos de otimização, que podem estar contribuindo para uma operação inadequada, uma vez que o Newave despacha usinas pertencentes ao reservatório equivalente, cujo somatório de energia estaria abaixo da média histórica considerada no modelo, elevando o deplecionamento da região.

A consultoria PSR apresentou no Energy Report de janeiro de 2014 – edição 85 alguns apontamentos relacionados ao fenômeno das vazões do rio São Francisco inferiores a média histórica. Neste relatório a consultoria afirma que há redução estrutural nas vazões e que o risco de racionamento não foi causado pela hidrologia desfavorável e demanda elevada. A PSR acredita, com base em suas simulações e análises, que a fragilidade do sistema elétrico brasileiro não é conjuntural, ou seja, não resulta de condições de seca, tampouco de um crescimento abrupto da demanda. As causas seriam as deficiências estruturais na capacidade de suprimento (PSR, 2014).

Baseado no estudo feito previamente pela PSR, este trabalho tem por objetivo fazer a análise das séries hidrológicas geradas pelo Newave com vistas a verificar se há mesmo um problema de sobre-estimação das séries geradas por este modelo.

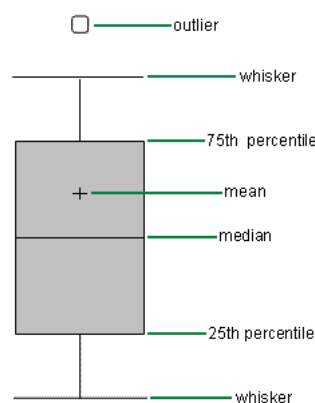
## 2. Metodologia

A fim de estudar o comportamento da afluência na região Nordeste do país e os impactos na operação energética do SIN foram analisadas neste estudo as 2.000 séries sintéticas de energia bruta (janeiro a abril de 2014) geradas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) no Programa Mensal de Operação – PMO. O período de estudo está contido no período úmido considerado pelo setor elétrico brasileiro, de janeiro a maio.

Como exposto anteriormente, o módulo de energias afluentes do Newave gera as séries sintéticas de energia, através do modelo auto-regressivo periódico – PAR(p). Além disso, as séries de energia são séries medidas no tempo, conhecidas como série histórica. Essa série é a realização de um processo estocástico e é dependente do evento denominado sorteio Logo, utiliza-se o modelo PAR para aproximar este comportamento estocástico. O modelo permite que se realizem, artificialmente, tantos sorteios quantos forem necessários para o estudo. Para cada sorteio existe uma série temporal, conhecida como série sintética (Oliveira, 2010).

Na modelagem do Newave foi definida a representação de 2.000 séries sintéticas, geradas artificialmente, que representassem então o conjunto de resultados de cada variável da otimização (CEPEL, 2012). Assim, com o objetivo de conhecer o comportamento das 2.000 séries sintéticas, objeto de análise deste estudo, utilizou-se a ferramenta Box Plot.

O Box Plot auxilia na representação da distribuição de um conjunto de dados com base em alguns de seus parâmetros descritivos: a mediana ( $q_2$ ), o quartil inferior ( $q_1$ ), o quartil superior ( $q_3$ ) e o intervalo interquartil ( $IQR = q_3 - q_1$ ), conforme indicada na figura 4.

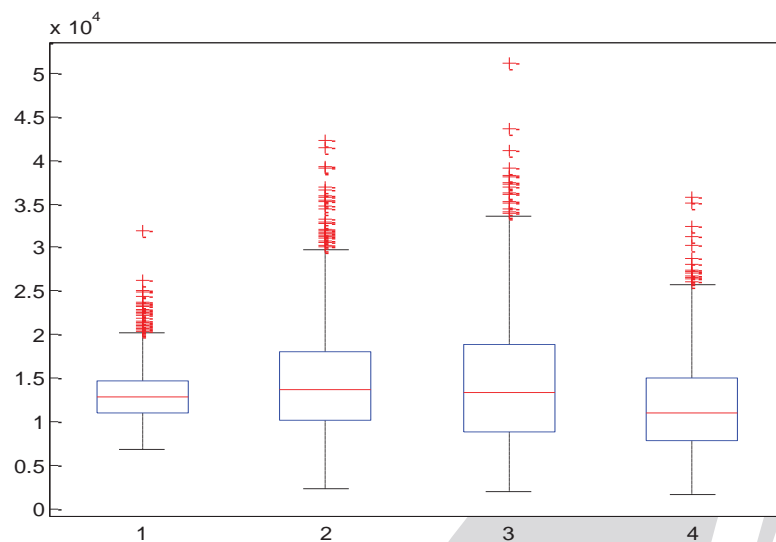


**Fig. 4. Representação gráfica – Box Plot**

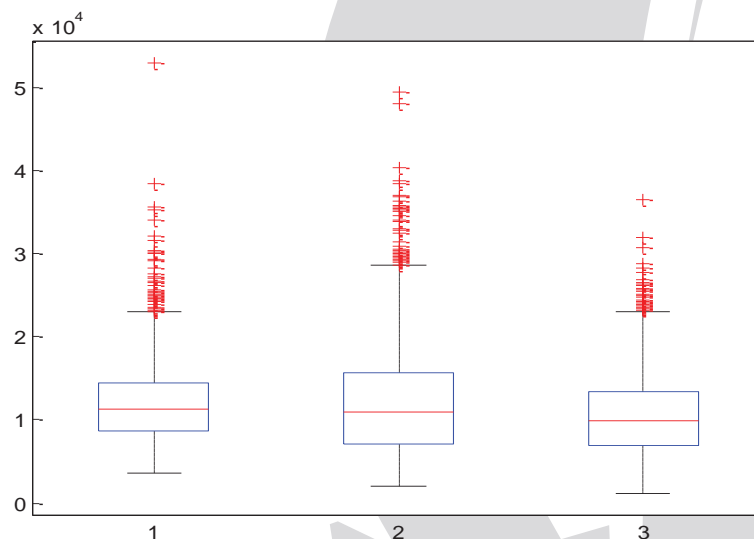
O uso do Box Plot é uma forma de representar graficamente os dados da distribuição de uma variável quantitativa em função de seus parâmetros. A ferramenta estatística também fornece informações importantes sobre o comportamento do conjunto de dados, como simetria e variabilidade. Se a amplitude for muito maior que a distância interquartílica e a mediana estiver mais próxima do 1º quartil do que do 3º quartil, há forte indicação de assimetria positiva e de grande dispersão das observações (UFF, 2015).

### 3. Resultados

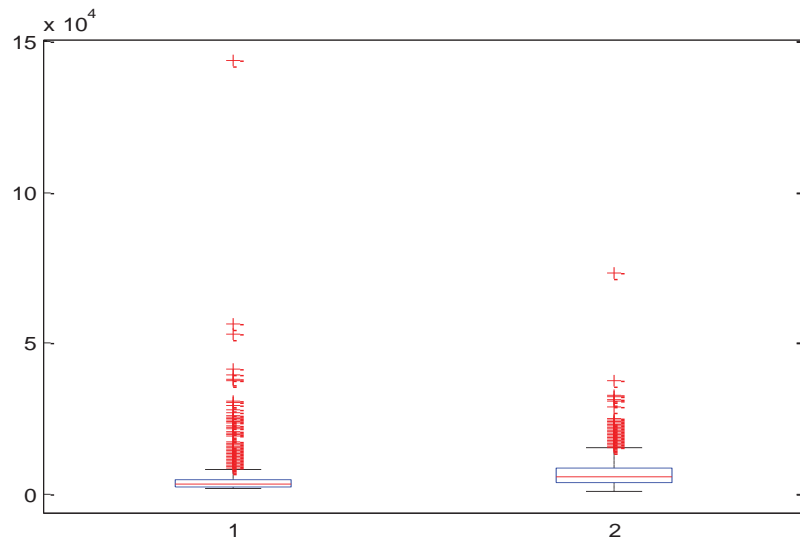
Considerando-se a simulação do PMO de janeiro a abril de 2014 e aplicando-se a ferramenta de análise Box Plot, encontraram-se os seguintes resultados sobre a distribuição de ENA bruta do Nordeste.



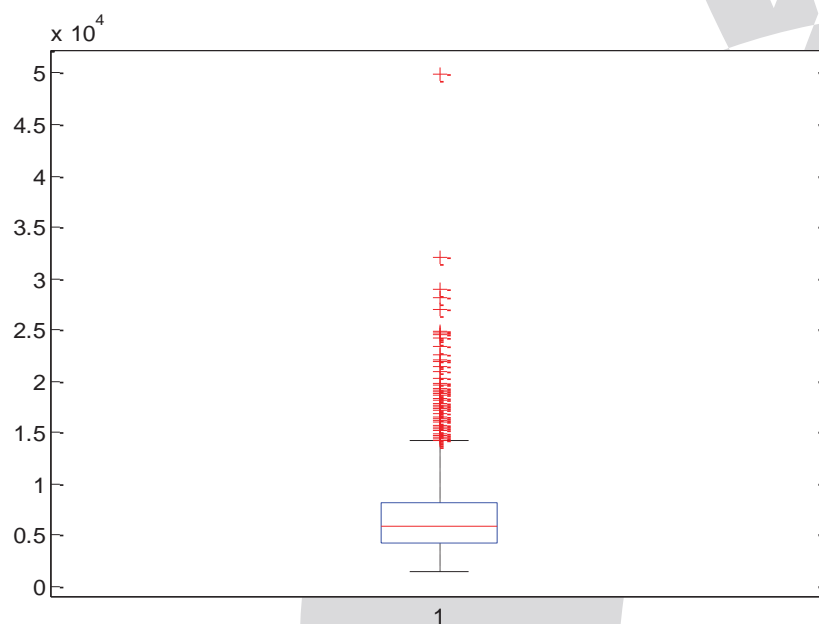
**Fig. 5. ENA (MW médios) - Jan a Abr/14 (PMO Jan/14)**



**Fig. 6. ENA (MW médios) - Fev a Abr/14 (PMO Fev/14)**



**Fig. 7. ENA (MW médios) - Mar a Abr/14 (PMO Mar/14)**



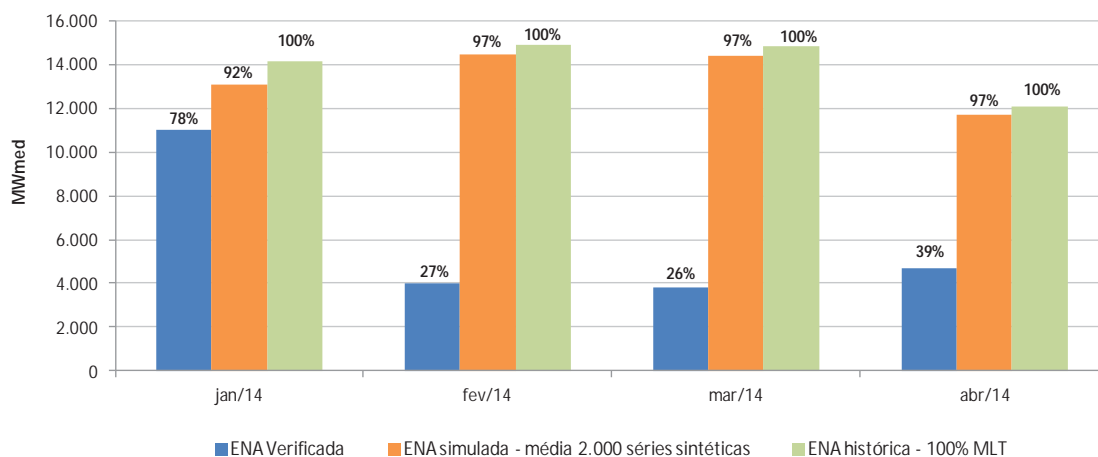
**Fig. 8. ENA (MW médios) - Abr/14 (PMO Abr/14)**

Observou-se, conforme mostrado nas figuras 5 a 8, a alta volatilidade das amostras para cada mês estudado. Isto ocorreu devido atualização dos dados iniciais da simulação para cada Programa Mensal da Operação – PMO. Outro aspecto relevante da amostra foi a indicação de algumas séries sintéticas com valores extremos no quartil superior (q3), o que demonstra uma sobre-estimação do modelo utilizado.

Utilizando os resultados de ENA obtidos da simulação do Newave para o PMO de janeiro/14 como exemplo de comparação com a média histórica e os valores verificados no



período proposto pelo estudo – janeiro a abril de 2014 – percebe-se que o modelo Newave está sobre-estimando as séries de ENA, conforme pode ser visto na figura 9. Nesta figura pode-se observar que as ENAs reais verificadas (barras azuis) estão muito abaixo da média das ENAs geradas pelo modelo PAR(p) – barras laranjas – e das médias de longo termo mensais (barras verdes).



**Fig. 9. MLT da região nordeste – % da MLT e MWmed (Fonte: ONS)**

Como exposto anteriormente, a consultoria PSR publicou em janeiro de 2014 a edição 85 do *Energy Report*, que procurou esclarecer questões quanto à segurança de suprimento do sistema elétrico brasileiro. No estudo, a consultoria levantou alguns pontos de fragilidade na consideração das aflúências pelo modelo Newave, e conseqüentemente, no uso dos reservatórios do SIN.

Para a PSR o esvaziamento real dos reservatórios ocorre a uma taxa maior que a indicada nas simulações oficiais.

A esse fenômeno a consultoria denominou de “fator de fricção”, provocado pela combinação de alguns aspectos relacionados à modelagem e a operação atual.

Esse comportamento fica mais evidente à medida que se aumenta o horizonte de previsão, ou seja, quando há aumento das incertezas devido ao tamanho do período de estudo, como acontece nas amostras avaliadas no PMO Jan/14. É muito provável pelo exposto acima que, a geração das séries sintéticas com valores de ENA elevados quando comparados com os verificados nos últimos anos comprovam a hipótese levantada neste trabalho, corroborando o estudo feito pela PSR.

#### 4. Considerações Finais

Verificou-se neste estudo que há geração de séries sintéticas de ENA com valores significativamente superiores aos valores verificados nos últimos anos e que o uso dos reservatórios tem sido prejudicado pelas diretrizes equivocadas da política de operação do modelo Newave. Estes resultados comprovam a hipótese levantada neste trabalho e corrobora o estudo feito pela PSR, que há um “fator de fricção” entre o esvaziamento real e o simulado dos reservatórios. Vale colocar que, apenas com medição das vazões do Rio São Francisco e dos seus afluentes, esta hipótese terá alta probabilidade de ser confirmada.

A partir da metodologia empregada e das questões apresentadas neste estudo, propõe-se como trabalho futuro a investigação sobre as principais causas da redução da energia (MW<sub>médio</sub>) da região Nordeste e o aprofundamento dos impactos na otimização energética do SIN.

## Referências

CEPEL. Manual de referência – Modelo Newave, revisão 1, p. 8-40, janeiro 2012.

CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos) /ANA (Agência Nacional de Águas). “A questão da água no Nordeste”. Brasília, DF, 2012.

Kligerman, A.S., “Operação ótima de subsistemas hidrotérmicos interligados utilizando programação dinâmica estocástica dual”. Dissertação de Mestrado, Unicamp-FEEC, 1992.

Maceira, M.E.P., "Operação Ótima de Reservatórios com Previsão de Afluências". Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, março 1989.

Oliveira, F. C. “Nova abordagem para geração de cenários de afluências no planejamento da operação energética de médio prazo”. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, março 2010.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Histórico de energia natural afluente por subsistema. Acesso: dez/2014. Disponível: [http://www.ons.org.br/historico/energia\\_natural\\_afluente.aspx](http://www.ons.org.br/historico/energia_natural_afluente.aspx)

PSR. “Risco de Apagão: ‘Piti’ do Mercado ou Lentes Cor de Rosa do Governo?”. Energy Report, edição 85, janeiro 2014.

UFF. Conhecendo o Box Plot. Acesso: mai/15. Disponível: [http://www.uff.br/cdme/conheceboxplot/conheceboxplot-html/conheceboxplot\\_intro.html](http://www.uff.br/cdme/conheceboxplot/conheceboxplot-html/conheceboxplot_intro.html)