



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

**COMPATIBILIDADE ENTRE CENÁRIOS SINTÉTICOS DE VAZÕES E ENERGIAS UTILIZADOS NO
PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE CURTO E MÉDIO PRAZOS**

**M.E.P.Maceira(*)
CEPEL, UERJ**

**J.M.Damázio
CEPEL, UERJ**

**W.L.Oliveira
CEPEL**

**D.D.J.Penna
CEPEL**

RESUMO

Na etapa de curto prazo do planejamento da operação energética, o processo estocástico de aflúncias aos reservatórios é representado através de uma árvore de aflúncias sintéticas de vazões geradas por um modelo PAR(p). Para a etapa de médio prazo são utilizadas séries sintéticas de energias naturais afluentes para cada subsistema equivalente. Sendo as duas etapas interligadas entre si através de funções de custo futuro, tem-se a necessidade de que ocorra a compatibilidade entre as distribuições empíricas de probabilidades das séries sintéticas geradas nos planejamentos de curto e médio prazos. Será mostrado que o processo estocástico de vazões, quando convertido em energias naturais, é aderente ao processo estocástico de energias naturais.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, Vazão afluente, Energia natural afluente, Geração de séries sintéticas

1.0 - INTRODUÇÃO

Para o sistema brasileiro de geração de energia elétrica, 80% de sua capacidade total de geração advém de usinas hidroelétricas. As usinas hidroelétricas estão situadas a grandes distâncias entre si, e dos centros de carga, e são dispostas em diferentes bacias hidrográficas de regimes hidrológicos distintos, sendo os recursos de cada bacia hidrográfica explorados em geral por mais de uma usina. Além disso, a grande variabilidade e pouca previsibilidade do processo de aflúncias de vazões naturais fazem com que o problema se torne essencialmente estocástico. A operação coordenada deste sistema é, portanto, uma tarefa difícil. O planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) é um problema complexo e de grande porte, sendo, por este motivo, resolvido em diversas etapas que consideram distintos horizontes temporais e diferentes graus de detalhamento da representação do sistema. A interligação entre as diferentes etapas do planejamento é realizada através de funções de custo futuro. Mais especificamente, o CEPEL desenvolveu uma cadeia de modelos computacionais [1], onde as etapas do planejamento da operação correspondem ao curto e médio prazos, e à programação da operação.

Para o planejamento hidrotérmico de curto prazo é utilizado o modelo DECOMP [2], que adota um horizonte temporal de até doze meses, sendo que o primeiro mês possui discretização semanal e os demais discretização mensal. No problema de curto prazo cada usina (hidroelétrica ou termoeletrica) da configuração é analisada individualmente. A estocasticidade das vazões afluentes em cada aproveitamento hidroelétrico, a partir do segundo mês, é representada através de uma árvore de aflúncias sintéticas de vazões geradas pelo modelo GEVAZP [3], [4] e [5], que utiliza um modelo autorregressivo periódico.

Para o planejamento da operação hidrotérmica de médio prazo, cujo horizonte temporal varia entre 5 e 10 anos, é utilizado o modelo NEWAVE, [6]. Nesta etapa as usinas hidroelétricas são representadas de forma agregada através de subsistemas equivalentes de energia, e não são analisadas individualmente. Portanto, em vez de trabalhar com séries sintéticas de vazões, são utilizadas séries sintéticas de energias naturais afluentes para cada subsistema equivalente. Assim como para as séries sintéticas de vazões, as séries sintéticas de energias naturais são geradas a partir do modelo GEVAZP (adotando também a modelagem autorregressiva periódica), que considera um histórico de energias naturais afluentes em vez de um histórico de vazões, como considerado no curto prazo.

Certamente há a necessidade de que ocorra a compatibilidade entre as distribuições empíricas de probabilidades das séries sintéticas geradas nos planejamentos de curto e médio prazos. Neste trabalho verifica-se que, para uma mesma configuração hidroelétrica, as séries sintéticas de vazões, quando convertidas em séries de energias naturais, são aderentes às séries sintéticas de energias naturais geradas para o planejamento da operação de médio prazo.

Para comprovar a compatibilidade entre as representações dos processos estocásticos de vazões e energias, é apresentada neste trabalho uma análise estatística das séries sintéticas de vazões convertidas em energias, e das séries sintéticas de energias para o médio prazo. São apresentados testes de distribuição de frequência e uma análise comparativa entre as médias e desvios-padrão de ambas as representações, com os valores teóricos decorrentes do modelo autorregressivo periódico utilizado na geração das energias.

2.0 - PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Uma característica fundamental do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos para o médio e curto prazos é a incerteza que envolve a representação da evolução futura da demanda energética, dos preços de combustíveis utilizados nas usinas termoelétricas e, especialmente para o SIN, as vazões afluentes aos aproveitamentos hidroelétricos, no caso do planejamento hidrotérmico de curto prazo, e as energias naturais afluentes aos subsistemas equivalentes, no caso do planejamento hidrotérmico de médio prazo.

Em relação às vazões ou às energias afluentes, uma abordagem consiste na adoção da hipótese de que ocorrências passadas, chamadas de séries históricas, proporcionam uma descrição razoável do que pode acontecer no futuro. Apesar de fornecer contribuições bastante úteis para algumas aplicações, os estudos com séries históricas apresentam limitações sérias, já que não é possível contemplar situações mais severas do que aquelas registradas no histórico. As séries históricas podem ser insuficientes para compor uma amostra que estime acuradamente alguns índices de risco, como por exemplo o não suprimento da demanda. Já os modelos estatísticos de geração de séries sintéticas de afluentes a partir da série histórica, resolvem a dificuldade mencionada por serem capazes de capturar características básicas das ocorrências passadas, permitindo ao mesmo tempo a avaliação de riscos e incertezas pertinentes a um sistema hidroelétrico, [7].

O planejamento da operação do SIN utiliza séries sintéticas do processo estocástico de vazões (ou energias naturais) mensais afluentes aos aproveitamentos hidroelétricos (ou subsistemas equivalentes) obtidas pelo Modelo de Geração de Séries Sintéticas de Vazões e Energias – GEVAZP. As séries sintéticas geradas pelo modelo GEVAZP são utilizadas no Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes Interligados – NEWAVE, no Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas para Subsistemas Hidrotérmicos Interligados – SUISHI-O [8], e no Modelo de Determinação da Coordenação da Operação à Médio Prazo – DECOMP, todos desenvolvidos pelo CEPEL e utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para, com exceção do modelo SUISHI-O, operar o SIN no curto e médio prazos.

O modelo NEWAVE calcula mensalmente, para um horizonte de 5 a 10 anos, a alocação hidrotérmica ótima, que minimiza o valor esperado da operação e custo de geração e penalidades de não suprimento da demanda. Os vários reservatórios distribuídos no SIN são, usualmente, agregados em 4 subsistemas equivalentes representando as regiões Sudeste, Sul, Nordeste e Norte do país. Existem basicamente 4 módulos que são representados pelo modelo NEWAVE:

- Reservatórios equivalentes. Os reservatórios de cada região (Sudeste, Sul, Nordeste e Norte) são agregados em um único reservatório equivalente. Assim sendo, as vazões afluentes a cada aproveitamento hidroelétrico são agregadas, levando em consideração a produtividade das usinas hidroelétricas, em energias equivalentes, que são denominadas energias naturais afluentes.
- Energia Natural Afluente. O processo estocástico das energias naturais é modelado pelo GEVAZP.
- Estratégia de Operação Hidrotérmica. Determina a estratégia mais econômica de operação do SIN, considerando as incertezas futuras de energias naturais afluentes.
- Simulação da Operação de Sistemas. Utiliza séries sintéticas de energias naturais para obter indicativos de risco de déficit, intercâmbios entre subsistemas, e custo marginal de operação.

O modelo NEWAVE simula um grande número de séries sintéticas de energias naturais, calculando assim, índices probabilísticos de desempenho do sistema para cada estágio da simulação. Estas diversas séries de energias naturais são geradas em uma estrutura paralela, também chamada de pente [3].

O modelo DECOMP tem como objetivo determinar as metas ótimas de geração mensal de cada usina de um sistema hidrotérmico, sujeito as incertezas nas vazões afluentes aos reservatórios. O problema de otimização correspondente consiste em encontrar uma estratégia que minimiza o valor esperado do custo de operação e déficit de energia ao longo do período de planejamento.

No modelo DECOMP, a incerteza acerca das vazões afluentes aos diversos aproveitamentos do sistema é representada através de cenários hidrológicos, dispostos como uma árvore de afluências com probabilidades de ocorrência, distintas ou não, associadas a cada cenário.

Por último, para a programação diária da operação, o modelo DESSEM-PAT [9] considera conhecidas as vazões afluentes a cada usina. A programação diária da operação estabelece os programas diários de geração de cada usina e intercâmbios de energias entre subsistemas para as previsões de carga em intervalos de 30 minutos, com base na operação definida pelo modelo DECOMP.

3.0 - GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS – MODELO GEVAZP

A representação acurada do processo estocástico de vazões (ou energias naturais) afluentes é um dos principais desafios encontrados no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos. Como mencionado na Seção 2, os dados históricos de afluências médias mensais se apresentam insuficientes para compor uma amostra de tamanho necessário para a elaboração de cálculos estatísticos importantes para a análise do comportamento do sistema elétrico. Assim sendo, é ajustado um modelo estocástico de afluências (vazões ou energias) naturais a cada aproveitamento hidroelétrico, ou a cada subsistema equivalente. O modelo estocástico pode então ser usado para representar o processo incerto, gerando uma grande quantidade de séries de afluências.

As séries hidrológicas de intervalo de tempo menor que o ano, tais como séries mensais, têm como característica o comportamento periódico das suas propriedades probabilísticas, como por exemplo, a média, a variância, e a estrutura de autocorrelação. A análise deste tipo de séries pode ser realizada pelas formulações autorregressivas, cujos parâmetros apresentam um comportamento periódico. A esta classe de modelos costuma-se denominar modelos autorregressivos periódicos, e são referenciados por PAR(p). A ordem p do modelo é o número de termos autorregressivos que determina a dependência com o passado. Em geral, p é um vetor, $p = (p_1, p_2, \dots, p_{12})$, onde cada elemento fornece a ordem de cada período, para maiores esclarecimentos, ver [3].

4.0 - CONVERSÃO DE VAZÕES AFLUENTES EM ENERGIAS NATURAIS AFLUENTES

Para análise comparativa entre as distribuições empíricas de probabilidades das séries sintéticas geradas nos planejamentos de curto e médio prazos, torna-se necessário converter as séries de vazões em séries de energias naturais. Os procedimentos para viabilizar a análise entre as séries sintéticas de vazões e energias são os seguintes:

- i. Escolha de uma configuração hidráulica.
- ii. Geração de uma quantidade N de séries de energias naturais para cada subsistema equivalente, pelo modelo GEVAZP.
- iii. Geração de N séries de vazões, para cada aproveitamento hidroelétrico, pelo modelo GEVAZP.
- iv. Conversão das séries de vazões em séries de energias naturais.

Na etapa (iv), as vazões afluentes aos reservatórios são agregadas em energias equivalentes, levando-se em consideração a disposição dos reservatórios e as produtibilidades de cada usina hidroelétrica.

Doravante, as séries de energias obtidas na etapa (ii) são denominadas de *Energia de Médio Prazo* (Energia m.p), e as séries obtidas a partir das etapas (iii) e (iv) são denominadas de *Energia de Curto Prazo* (Energia c.p.).

Com estes procedimentos, torna-se possível comparar estatisticamente o processo estocástico representado explicitamente pelas séries sintéticas de vazões com o processo estocástico representado explicitamente pelas séries de sintéticas de energias naturais.

Para este trabalho foi considerada a configuração hidráulica referente ao último período do horizonte de planejamento do PMO de janeiro de 2007. Ao todo foram elaborados 12 casos estudo, que se diferenciam pelo mês inicial do processo de geração das séries sintéticas (janeiro a dezembro). Para cada caso estudo, serão analisadas 2000 séries geradas de *Energia de Médio Prazo* e *Energia de Curto Prazo* para o primeiro mês do

estudo. A geração das séries sintéticas de energias e vazões afluentes foi realizada considerando o passado recente igual à média de longo termo (MLT).

5.0 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS – ADERÊNCIA ENTRE AS SÉRIES SINTÉTICAS

Uma análise estatística sobre a compatibilidade entre as representações dos processos estocásticos de aflúncias é realizada nesta seção. Será mostrado que, para uma mesma configuração hidroelétrica, as séries sintéticas de vazões convertidas em séries de energias são aderentes às séries sintéticas de energias geradas para o planejamento da operação de médio prazo.

Os testes estatísticos realizados nesta seção envolvem os testes de distribuição de frequência e análise comparativa entre as médias e desvios-padrão de ambas as representações com os valores teóricos decorrentes do modelo autorregressivo periódico utilizado na geração das energias (etapa ii, item 4.0).

5.1 Análise Estatística entre as Médias e os Desvios-padrão

Uma análise geral sobre a aderência das médias e desvios-padrão dos valores gerados às médias e desvios-padrão teóricos é apresentada nas Figuras 1 e 2. Para este exame são consideradas 2000 séries de energias. A Figura 1 apresenta os desvios $\bar{x}_{ger} - \mu_{teor}$ (representados pelas barras) e os intervalos de aceitação ao nível de significância de 5%, $\pm 1.96\sigma_{teor} / \sqrt{2000}$ (representados pelas linhas contínuas) para os meses de janeiro a dezembro. Os valores \bar{x}_{ger} , μ_{teor} e σ_{teor} correspondem à média amostral dos 2000 valores gerados, à média teórica, e ao desvio padrão teórico, respectivamente. Para detalhes sobre o cálculo dos valores teóricos, ver [10].

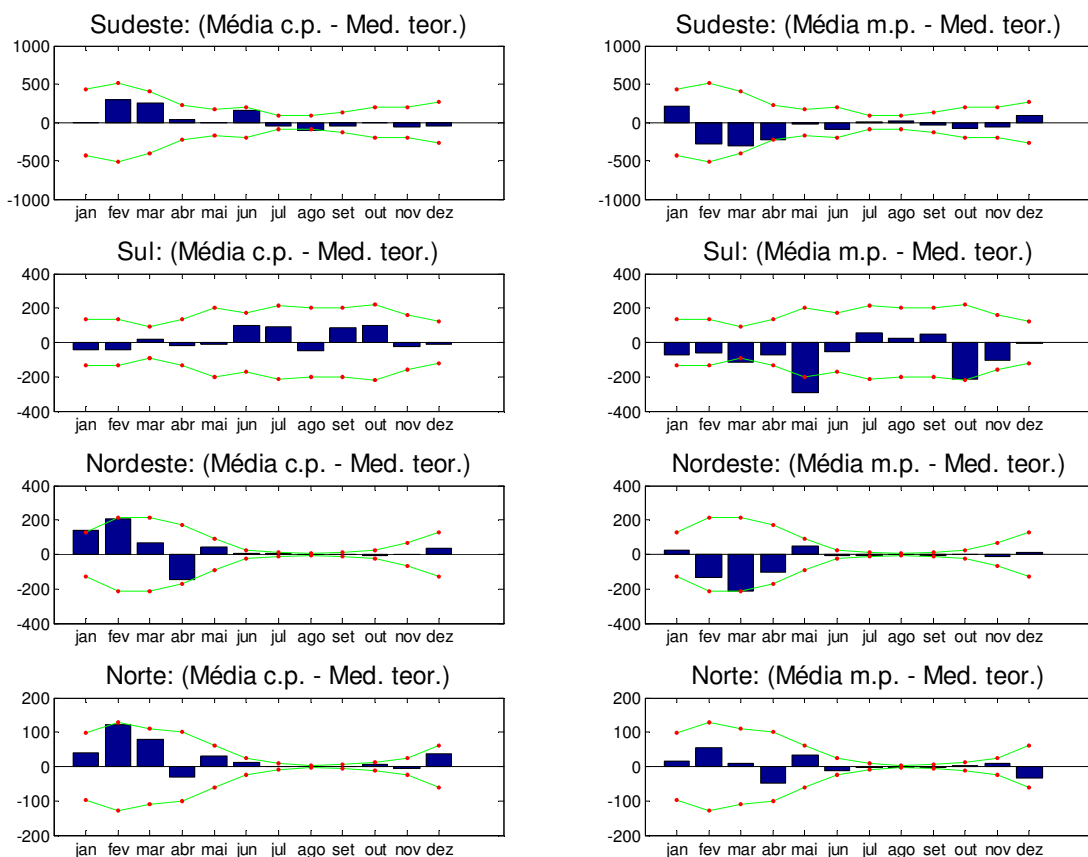


FIGURA 1 – Análise das Médias para Cada Mês

Nesta etapa foram realizados 48 testes (quatro subsistemas e doze meses). Com um nível de significância de 5%, pode-se aceitar até 3 valores fora do intervalo de aceitação. Como pode ser verificado na Figura 1, as médias amostrais dos valores gerados estão em sua grande maioria contidas no interior dos intervalos de aceitação. No caso das séries de Energia de Curto Prazo, apenas em um mês ocorre a ultrapassagem, enquanto que no caso das séries de Energia de Médio Prazo, a ultrapassagem ocorre em dois meses. Portanto, as médias dos valores gerados, para ambas as etapas de planejamento, são aderentes às médias teóricas, e neste sentido, aderentes entre si.

São apresentadas na Figura 2 as regressões lineares entre os desvios-padrão teóricos, e os desvios-padrão dos valores gerados de Energia de Curto Prazo e de Energia de Médio Prazo, respectivamente, levando em conta os 12 meses do ano de 2007. São fornecidos o coeficiente angular a da reta de regressão linear $y = ax$, e o coeficiente de determinação R square (R^2), que mede o ajuste da reta de regressão linear aos valores analisados, [11]. Espera-se que a e R^2 assumam valores próximos de 1. A linha contínua é a reta de regressão linear que se deseja coincidir com linha tracejada $y = x$.

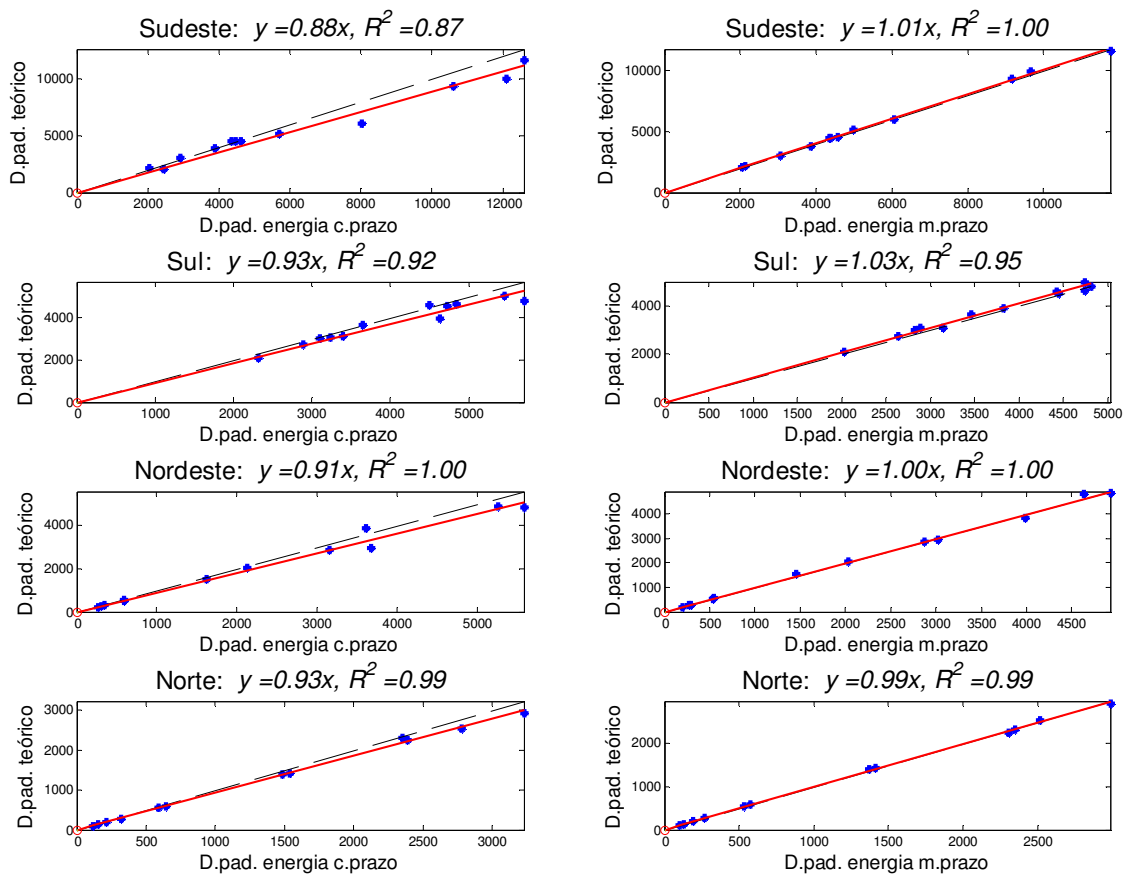


FIGURA 2 – Análise das Desvios-Padrão para Cada Mês

Como era de se esperar, os desvios-padrão dos valores gerados para a etapa de médio prazo estão bem aderentes aos desvios-padrão teóricos. A aderência observada para a etapa de curto prazo é menor, mas ainda assim muito boa. Desta forma, pode-se concluir que a variabilidade do processo estocástico das vazões afluentes é compatível com a variabilidade do processo estocástico das energias afluentes.

5.2 Regressão Linear entre as Séries de Energias

São apresentadas na Figura 3 as regressões lineares entre os valores ordenados de Energias de Curto Prazo (representadas no eixo das abscissas), e os valores ordenados de Energia de Médio Prazo (representadas no eixo das ordenadas), para os meses de fevereiro, junho, e novembro de 2007. São apresentados, para cada mês e subsistema, o coeficiente angular a e o coeficiente de determinação R^2 .

Como podem ser verificadas na Figura 3, as distribuições das vazões convertidas em energias são aderentes às distribuições de energias naturais utilizadas no planejamento de médio prazo. As retas de regressão linear possuem inclinações de aproximadamente 45 graus ($a \approx 1$). Os maiores desvios correspondem às aflúências muito elevadas, que apresentam baixa probabilidade de ocorrência,

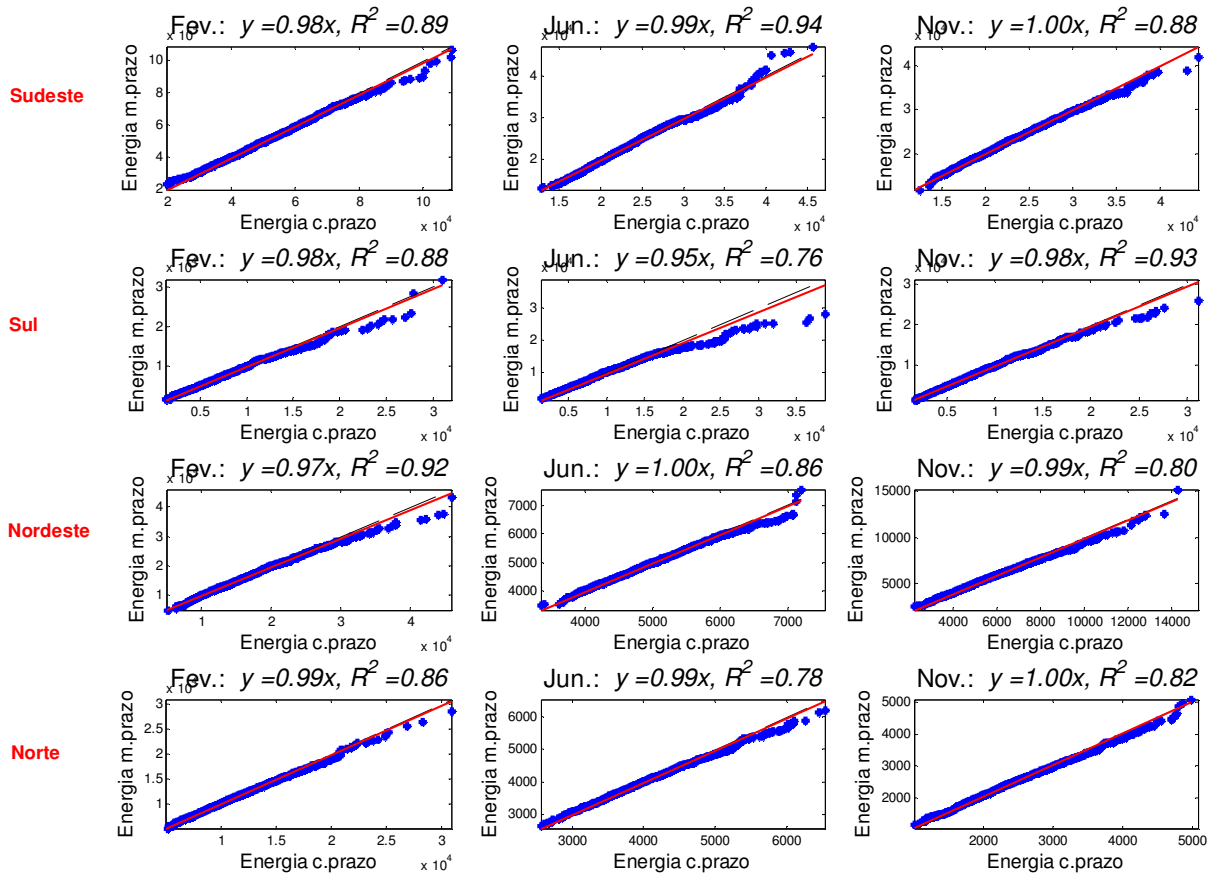


FIGURA 3 – Regressão Linear Entre os Valores Ordenados

5.3 Testes de Kolmogorov-Smirnov

Uma maneira de avaliar os processos estocásticos de vazões e energias consiste em realizar o teste de Kolmogorov-Smirnov [12], que mede a aderência entre duas distribuições de probabilidades. Se o valor obtido (*P-valor*) for superior ao nível de significância (neste estudo foi adotado o nível de 1%), considera-se que as distribuições de probabilidades, referentes às vazões convertidas em energias e às energias geradas para o médio prazo, são aderentes.

São apresentados na Figura 4 o *P-valor* e a máxima diferença (*MaxDif*) entre as distribuições acumuladas de probabilidades de cada subsistema, para os meses fevereiro, junho e novembro de 2007.

Não se espera que os valores gerados para o curto e médio prazos sejam provenientes de uma mesma distribuição de probabilidades. De fato eles não são. As energias convertidas são oriundas do processo estocástico de vazões naturais, enquanto as energias geradas para o médio prazo são provenientes do processo estocástico de energias naturais. É esperado que os processos estocásticos sejam aderentes. Este resultado é comprovado pela Figura 4. Como pode ser verificado, o teste de Kolmogorov-Smirnov aceita a hipótese (nula) de que a distribuição da amostra de energias para o curto prazo é aderente à distribuição da amostra de energias para o médio prazo, a um nível de significância de 1% ($P\text{-valor} \geq 0.01$).

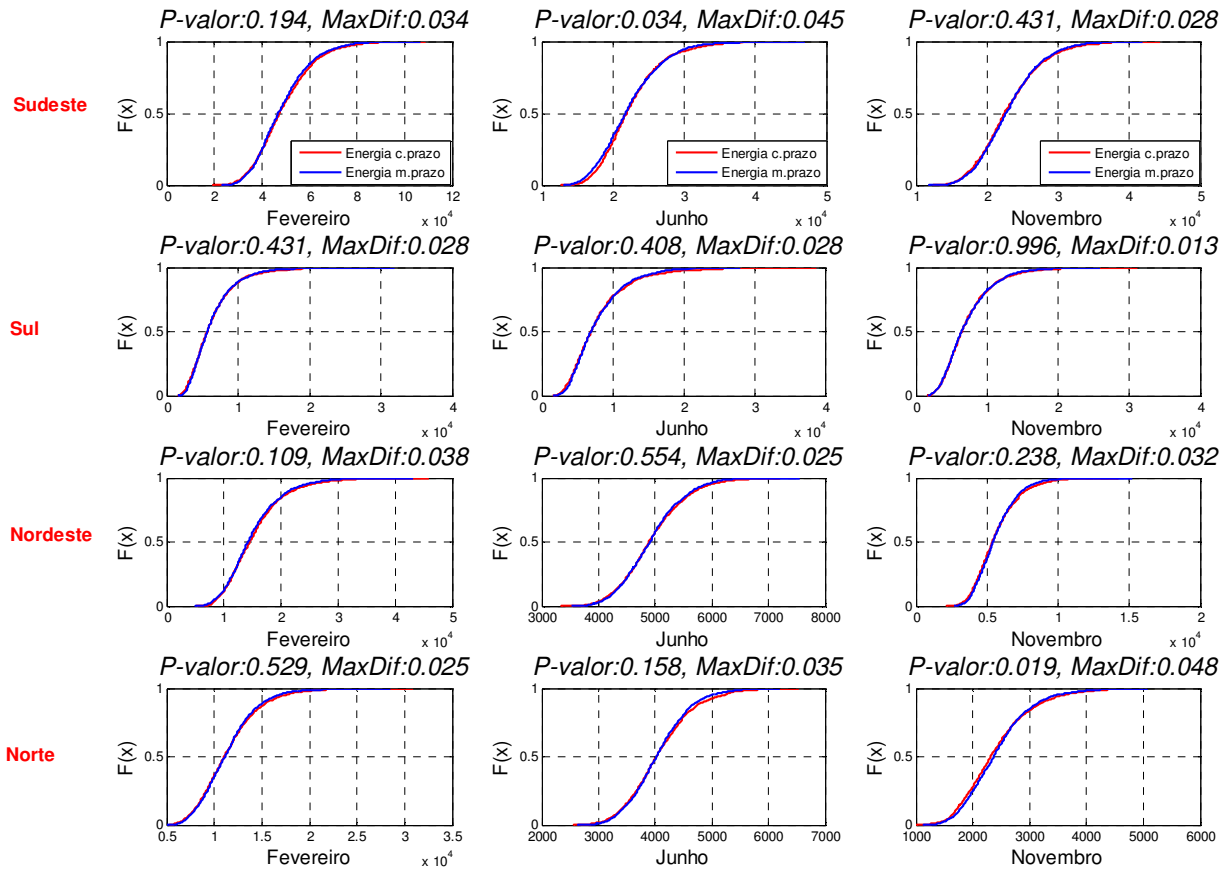


FIGURA 4 – Funções de Distribuição Acumulada

As máximas diferenças (*MaxDif*) entre cada par de distribuições acumuladas apresentadas são bastante pequenas. Uma análise para os 12 meses foi realizada fornecendo pequenas diferenças entre as distribuições. Os valores médios das *MaxDif* entre cada par de distribuições acumuladas são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Valores Médios das Máximas Diferenças

Subsistema	Média das MaxDif
Sudeste	0.046
Sul	0.032
Nordeste	0.041
Norte	0.037

Portanto, as distribuições empíricas de probabilidade das Energias de Curto Prazo e de Médio Prazo se apresentam bastante aderentes.

6.0 - CONCLUSÃO

A compatibilidade entre o processo estocástico de vazões afluentes e o processo estocástico de energias naturais afluentes é de essencial importância para o planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional devido à interligação entre o curto e médio prazos, dada pelas funções de custo futuro. Como pode ser verificado na Seção 5, o processo estocástico de vazões afluentes, convertidas em energias naturais afluentes, se apresenta bastante aderente ao processo estocástico de energias naturais utilizadas no médio prazo. Este resultado é comprovado pelas inclinações das retas de regressão linear, e pelos gráficos das distribuições acumuladas das séries sintéticas geradas para os meses estudados.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M.E.P. Maceira, L.A. Terry, J.M. Damázio, F.S. Costa, A.C.G. Melo "Chain of Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System, Power". System Computation Conference – PSCC'02, Sevilla, Spain, 2002, June 24-28, pp. 1-4.
- (2) L.N. Xavier, A.L.S. DINIZ, F.S. Costa, M.E.P. Maceira. "Aprimoramento da Modelagem da Função de Produção Energética das Usinas Hidroelétricas no Modelo DECOMP: Metodologias e Resultados". XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, PR, 2005, outubro 6-21.
- (3) M.E.P. Maceira, D.L.D.D. Jardim. "Modelo de Geração de Séries Sintéticas de Energia e Vazões – GEVAZP – Manual de Referência" In: Relatório Técnico DPP/PEL 83/2000, CEPEL, Rio de Janeiro.
- (4) D.L.D.D. Jardim, M.E.P. Maceira, D.M. Falcão. "Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems Using Clustering Techniques" In Anais do IEEE Porto Power Tech Conference, vol.3, Porto, Portugal, 2001, Sep., pp 3-5.
- (5) M.E.P. Maceira, C.V. Bezerra. "Stochastic Streamflow model for Hydroelectric Systems" In: Proceedings of 5th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Vancouver, Canada, 1997, Sep., pp. 305-310.
- (6) M. E. P. Maceira, V. S. Duarte, D. D. J. Penna, L. A. M. Moraes, A. C. G. Melo. "Ten Years of Application of Stochastic Dual Dynamic Programming in Official and Agent Studies in Brazil Description of the NEWAVE Program" In: 16th Power Systems Computation Conference, Glasgow, 2008..
- (7) M.E.P. Maceira, D.D.J. Penna, J.M. Damázio. "Geração de Cenários Sintéticos de Energia e Vazão para o Planejamento da Operação Energética" In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2005, pp. 3-12.
- (8) M.E.P. Maceira, S.H.F Cunha. "Simulating the Energy Generation of the Interconnected Hydro-thermal System – SUISHI Model", XII Brazilian Seminar on Electrical Power Production and Transmission – SNPTEE, Balneário de Camboriú, Brazil, 1995.
- (9) A.L. Diniz, T.N. Santos, M.E.P. Maceira. "Short term security constrained hydrothermal scheduling for large scale systems considering transmission losses", IEEE/PES Transm. Distr. Conf. Expos. Latin America, Caracas, Venezuela, 2006, pp 2-6.
- (10) W.L. Oliveira, C. Sagastizábal, D.D.J. Penna, M.E.P. Maceira, J.M. Damázio. "Optimal Scenario Tree Reduction for Stochastic Streamflows in Power generation Planning Problems". International Conference on Engineering Optimization – EngOpt 2008, Rio de Janeiro, June 01-05, p. 4.
- (11) D.N. Gujarati. *Econometria Básica*. Makron Books, 3th ed. 2000, pp. 64-70.
- (12) S. Seigel. *Estatística Não Paramétrica*, São Paulo, Mc Graw-Hill, 1975, pp. 144-155.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Maria Elvira Piñeiro Maceira possui graduação em Engenharia Civil pela UFRJ (1983), mestrado (1989) e doutorado em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ (1994). É professora adjunta da UERJ e pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Atualmente é chefe de Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente. Atua principalmente nos seguintes temas: modelagem estocástica multivariada para previsão e geração de vazões, planejamento da expansão e operação de sistemas hidrotérmicos interligados, otimização estocástica e hidrologia.

Jorge Machado Damázio possui graduação em Engenharia Civil pela UFRJ (1977), mestrado (1979) e doutorado em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ (1988). Atualmente é pesquisador do CEPEL e professor adjunto da UERJ. Tem experiência na área de Engenharia Sanitária com ênfase em Controle de Enchentes e Barragens, atuando principalmente nos seguintes temas: controle de cheias, hidroeletricidade, previsão de vazões, hidrologia e geração de energia elétrica.

Welington Luis de Oliveira possui graduação em Matemática pela Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Boa Esperança - FAFIBE (2003) e mestrado em Matemática pelo Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada - IMPA (2007). Atualmente é pesquisador do CEPEL, atuando principalmente nos seguintes temas: otimização estocástica, processos estocásticos e planejamento energético de curto prazo.

Débora Dias Jardim Penna possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF (1997) e mestrado em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ (2002). Atualmente é pesquisadora do CEPEL, atuando principalmente nos seguintes temas: geração de séries sintéticas, modelos estocásticos multivariados, técnicas de agregação e planejamento da operação interligada.