

Relatório Técnico

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CENÁRIOS HIDROLÓGICOS GERADOS PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE MÉDIO E CURTO PRAZOS

Projeto GEVAZP

ÍNDICE

ÍNDICE	II
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS	3
3 - GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS – MODELO GEVAZP	6
4 - CONVERSÃO DE VAZÕES AFLUENTES EM ENERGIAS NATURAIS AFLUENTES	8
5 - RESULTADOS NUMÉRICOS – ADERÊNCIA ENTRE AS SÉRIES SINTÉTICAS 9	9
5.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA ENTRE AS MÉDIAS E OS DESVIOS-PADRÃO	9
5.2 - REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS SÉRIES DE ENERGIAS	12
5.3 - GRÁFICO <i>BOX PLOT</i>	13
5.4 - FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA	14
5.5 - COMPARAÇÃO DAS SÉRIES GERADAS	21
5.6 - COMPARAÇÃO DAS CORRELAÇÕES CRUZADAS	27
6 - CONCLUSÕES	29
BIBLIOGRAFIA	30

1 - INTRODUÇÃO

Para o sistema brasileiro de geração de energia elétrica, 80% de sua capacidade total de geração advêm de usinas hidroelétricas. As usinas hidroelétricas estão situadas a grandes distâncias 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 aflúências 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, que traduzem o impacto de uma decisão hoje no valor esperado do custo total de operação ao longo do horizonte de planejamento. Mais especificamente, o Centro de Pesquisas de Energias Elétrica – CEPEL – desenvolveu uma cadeia de modelos computacionais, Maceira *et al.* (2002), para o planejamento da operação de curto e médio prazos, e para a programação da operação.

Para o planejamento hidrotérmico de curto prazo é utilizado o modelo DECOMP, Xavier *et al.* (2005), 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 termoelétrica) da configuração é analisada individualmente. A estocasticidade das vazões afluentes em cada aproveitamento hidroelétrico é representada através de uma árvore de aflúências sintéticas de vazões geradas pelo modelo GEVAZP, Maceira *et al.* (2000) e Jardim *et al.* (2001), que utiliza um modelo autorregressivo periódico.

Para auxiliar o planejamento hidrotérmico de médio prazo, cujo horizonte temporal varia entre 5 e 10 anos, é utilizado o modelo NEWAVE, Maceira *et al.* (2008). Nesta etapa as usinas hidroelétricas são representadas de forma agregada através de subsistemas equivalentes de energia. 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. Dessa forma, é desejável que ocorra 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, neste trabalho é apresentada uma análise estatística entre as séries sintéticas de vazões convertidas em energias, e as 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.

Este trabalho está organizado como se segue: na Seção 2 são apresentadas as características do planejamento e operação de sistemas hidrotérmicos. A Seção 3 fornece uma introdução do processo de geração de séries sintéticas através do modelo GEVAZP. Um breve comentário acerca da conversão das séries de vazões afluentes, em séries sintéticas de energias naturais afluentes é realizado na Seção 4, reservando às Seções 5 e 6, os resultados numéricos e as principais conclusões, respectivamente.

2 - 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 aflúências 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, Maceira *et al.* (2005).

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, Maceira *et al.* (1995), 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, operar o SIN no curto e médio prazos.

Os modelos NEWAVE e SUISHI-O simulam 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, conforme ilustrado na figura 1.

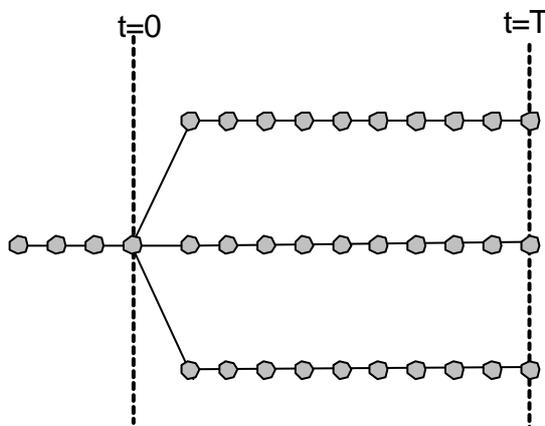


Figura 1 – Séries em Paralelo.

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. Atualmente, os vários reservatórios distribuídos no SIN são agregados em 4 subsistemas equivalentes representando as regiões Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte do país, para a sua utilização no âmbito do PMO. Existem basicamente 4 módulos que são representados pelo modelo NEWAVE:

- Reservatórios equivalentes. Os reservatórios de cada região (Sudeste/Centro-Oeste, 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, produzindo-se conjuntos de cenários sintéticos de energias para as etapas *forward*, *backward* e simulação da operação com a política de operação calculada.
- 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, custo marginal de operação, dentre outros índices de desempenho do sistema.

Para o 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, ilustrada na figura 2, com probabilidades de ocorrência, distintas ou não, associadas a cada cenário.

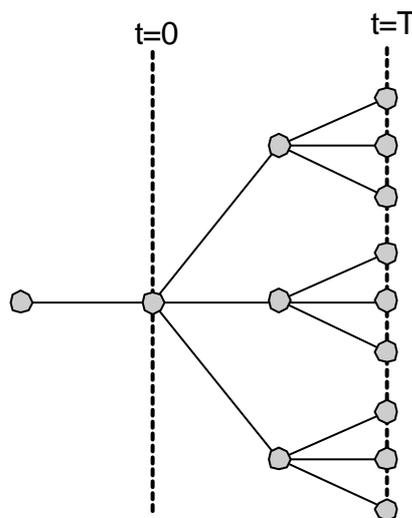


Figura 2 – Séries em Árvore.

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.

Por último, para a programação diária da operação, o modelo DESSEM-PAT, Diniz *et al.* (2006), considera conhecidas as vazões afluentes a cada usina. A programação diária da operação estabelece os programas diários de geração e intercâmbios de energias entre subsistemas (e entre agentes) para as previsões de carga em intervalos de 30 minutos, com base na operação definida pelo modelo DECOMP.

Sendo os processos estocásticos das etapas do planejamento de interesse deste trabalho representados por séries sintéticas geradas pelo modelo GEVAZP, a seção seguinte introduz o método de geração de séries sintéticas adotado pelo modelo.

3 - 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 SIN. Assim sendo, um modelo estocástico de afluências (vazões ou energias) naturais a cada aproveitamento hidroelétrico, ou a cada subsistema equivalente se faz necessário. O modelo estocástico pode então ser usado para representar o processo incerto, gerando uma grande quantidade de séries de afluências, conforme ilustrado na figura 3.

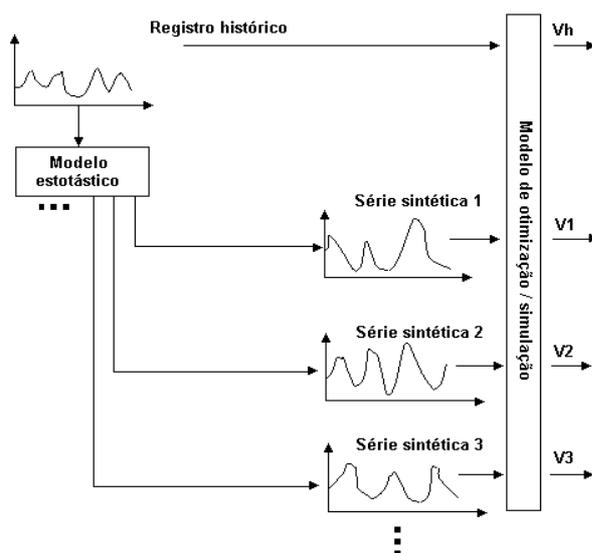


Figura 3 – Geração de Séries Sintéticas.

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.

O modelo $PAR(p_1, p_2, \dots, p_{12})$ pode ser descrito matematicamente por:

$$\left(\frac{Z_t - \mu_t}{\sigma_t} \right) = \phi_1^m \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{t-1}}{\sigma_{t-1}} \right) + \dots + \phi_{p_m}^m \left(\frac{Z_{t-p_i} - \mu_{t-p_i}}{\sigma_{t-p_i}} \right) + a_t \quad (1)$$

onde Z_t é a série sazonal, t é o índice do período sazonal, μ_t é a média sazonal, σ_t é o desvio-padrão sazonal, ϕ_i^t é o i -ésimo coeficiente autorregressivo, p_i é a ordem do operador autorregressivo do período t e a_t é a série de ruídos independentes com média zero e variância $\sigma_{a_t}^2$.

A média e a variância teóricas do modelo $PAR(p_1, p_2, \dots, p_{12})$ são dadas respectivamente por (2) e (3):

$$E[Z_t | t_-] = \mu_t + \sigma_t \left[\phi_1^t \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{t-1}}{\sigma_{t-1}} \right) + \dots + \phi_{p_i}^t \left(\frac{Z_{t-p_i} - \mu_{t-p_i}}{\sigma_{t-p_i}} \right) \right] \quad (2)$$

$$VAR[Z_t | t_-] = \sigma_t^2 \sigma_{a_t}^2 \quad (3)$$

Para detalhes sobre o modelo $PAR(p)$ consulte Maceira *et al.* (1997 e 2000) e sobre o cálculo dos valores teóricos, Damázio *et al.* (2008).

Na próxima seção será apresentado o procedimento utilizado para a conversão das séries de vazões afluentes em séries de energias naturais afluentes, adotado neste trabalho.

4 - CONVERSÃO DE VAZÕES AFLUENTES EM ENERGIAS NATURAIS AFLUENTES

Para uma 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. Escolher uma configuração hidráulica.
- ii. Gerar uma quantidade N de séries de energias naturais para cada subsistema equivalente, pelo modelo GEVAZP.
- iii. Gerar N séries de vazões, para cada aproveitamento hidroelétrico.
- iv. Converter as 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.prazo), e as séries obtidas a partir das etapas (iii) e (iv) são denominadas de *Energia de Curto Prazo* (Energia c.prazo).

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 as 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 - RESULTADOS NUMÉRICOS – ADERÊNCIA ENTRE AS SÉRIES SINTÉTICAS

Uma análise estatística sobre a compatibilidade entre as representações dos processos estocásticos de afluições 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. Os testes são realizados em amostras com 2000 séries de energias.

5.1 - Análise estatística entre as médias e os desvios-padrão

Nesta subseção é realizada uma análise estatística das médias e desvios-padrão tendo como referência os valores teóricos correspondentes ao modelo autorregressivo periódico – $PAR(p)$ – das energias [equações (2) e (3)].

A média e o desvio-padrão amostrais são dados respectivamente por (4) e (5):

$$\bar{Z}_t = \frac{\sum_{i=1}^n Z_t^i}{n} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_t^i - \bar{Z}_t)^2}{n}} \quad (5)$$

onde n é o número de cenários gerados. Neste estudo $n = 2000$.

Uma análise geral sobre a aderência das médias e desvios-padrão dos valores gerados às médias e desvios-padrão teóricos é apresentada nas figuras 4 e 5. Os resultados apresentados do lado direito são referentes às séries de *Energia de Médio Prazo*, enquanto os resultados do lado esquerdo são referentes às séries de *Energia de Curto Prazo*. Vale ressaltar que os valores teóricos de média e desvio padrão foram calculados considerando o modelo ajustado para geração das séries de *Energia de Médio Prazo* (etapa ii, item 4).

Na figura 4 é apresentada a diferença entre a média gerada e a média teórica, dada por $\bar{Z}_t - E[Z_t|t_-]$ e representada por uma barra, e os intervalos de aceitação ao

nível de significância de 5%, dados por $\pm 1.96 \sqrt{\frac{\text{VAR}[Z_t | t_-]}{n}}$ e representados pelas

linhas contínuas. Esta análise é realizada para os meses de janeiro a dezembro.

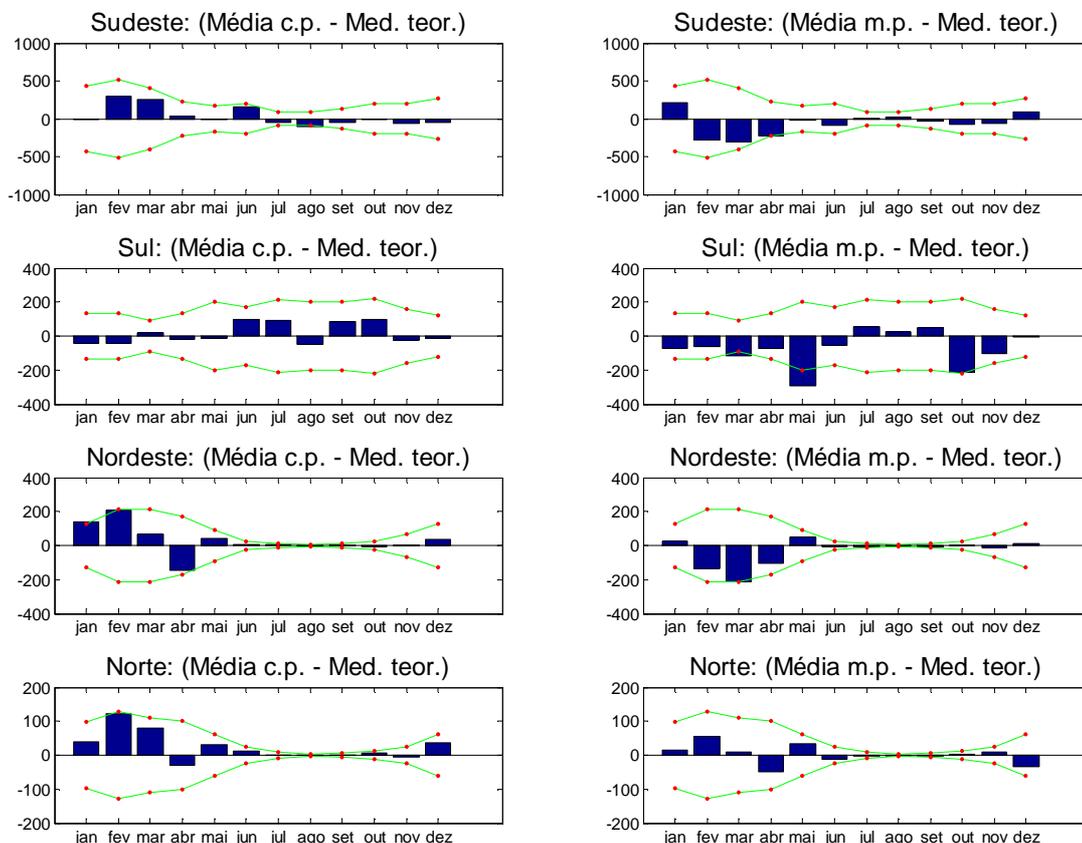


Figura 4 – Análise das médias para cada mês. 2000 séries.

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 4, 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 5 as regressões lineares entre os desvios-padrão teóricos e os desvios-padrão dos valores gerados de *Energia de Curto Prazo* (coluna a

esquerda) e de *Energia de Médio Prazo* (coluna a direita), 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, Gujarati (2000). 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 $y = x$. Novamente, os valores teóricos de desvio padrão foram calculados considerando o modelo ajustado para geração das séries de *Energia de Médio Prazo* (etapa ii, item 4).

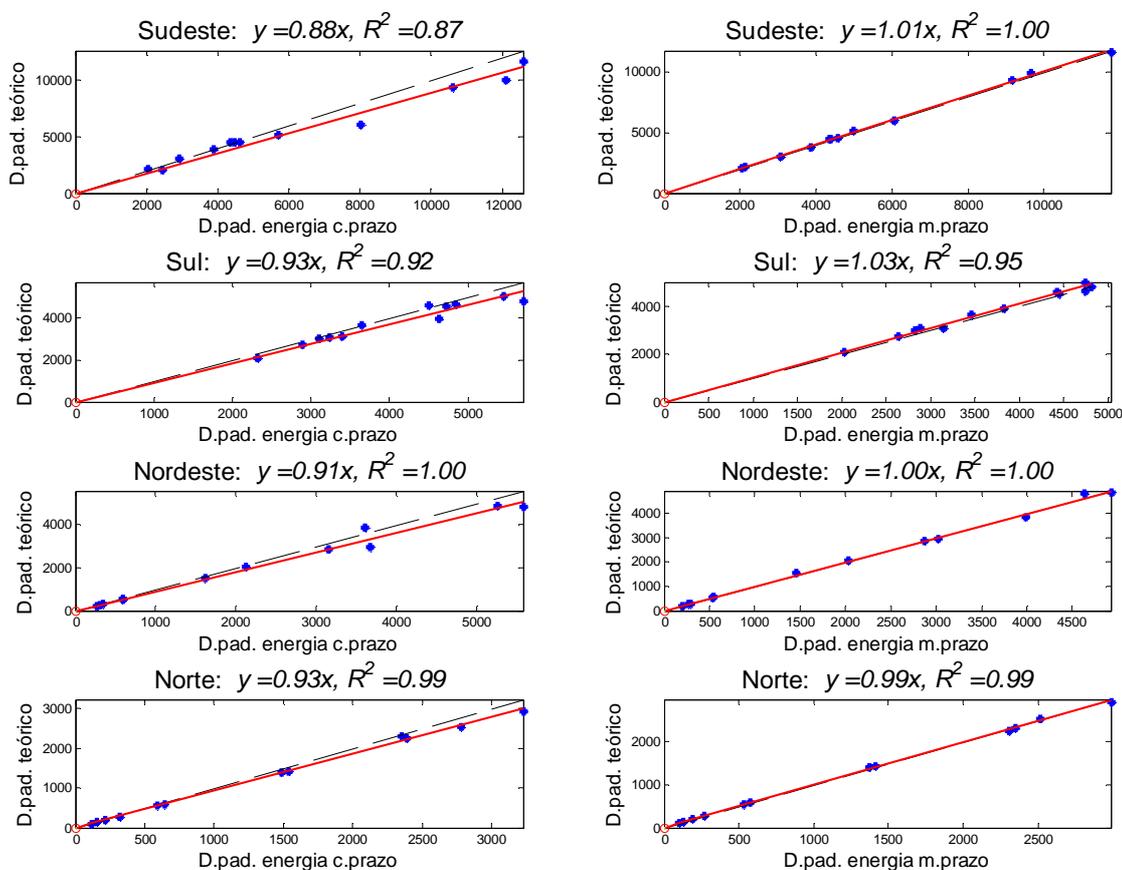


Figura 5 – Análise dos desvios-padrão para cada mês. 2000 séries.

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 um pouco 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.

Verificada a compatibilidade entre as médias e desvios-padrão das séries de energias das etapas de curto e médio prazos, resta analisar as distribuições empíricas dos valores gerados. Inicia-se este exame com as regressões lineares.

5.2 - Regressão linear entre as séries de energias

São apresentadas na figura 6 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 .

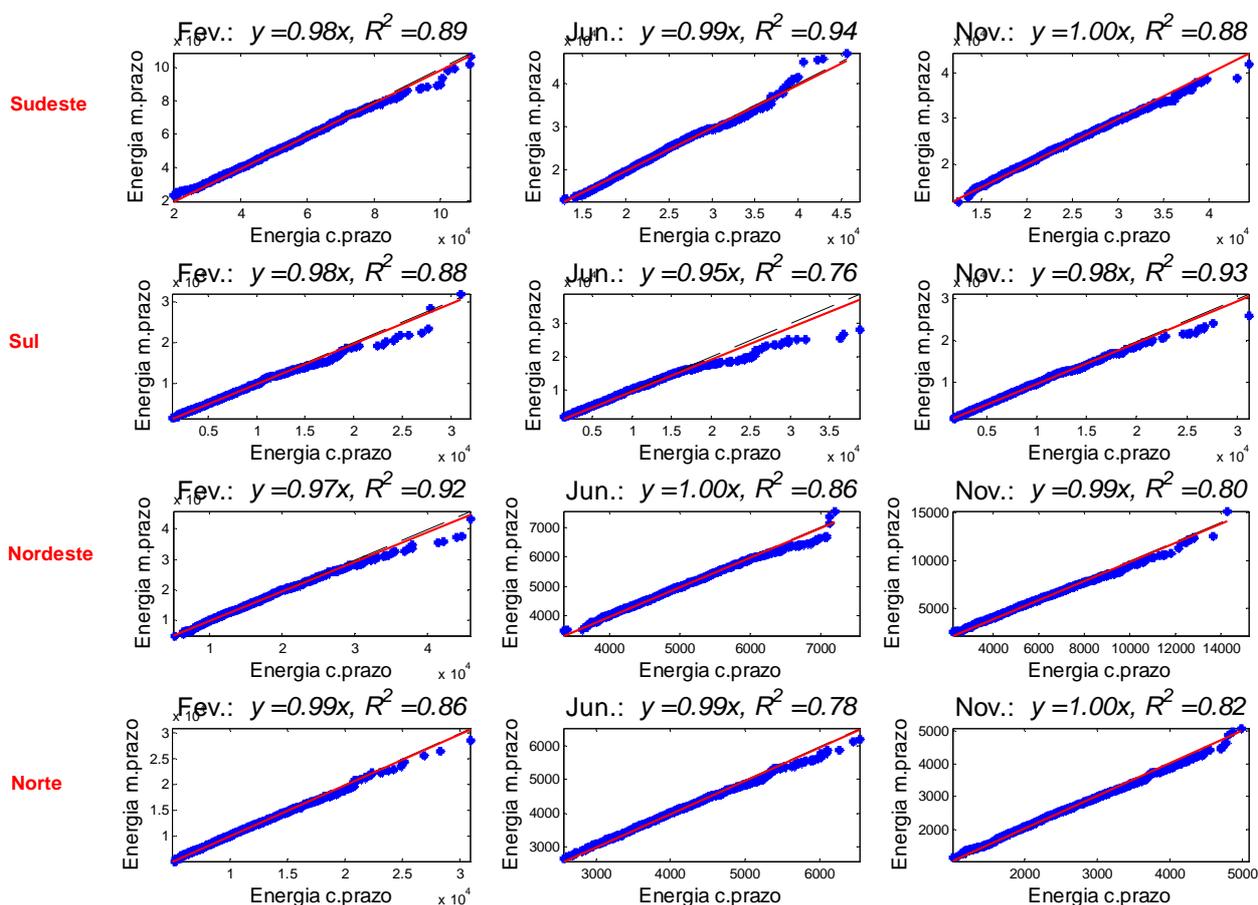


Figura 6 – Regressão linear entre os valores ordenados.

Como podem ser verificadas na figura 6, as distribuições das vazões convertidas em energias são aderentes às distribuições de energias naturais utilizadas no

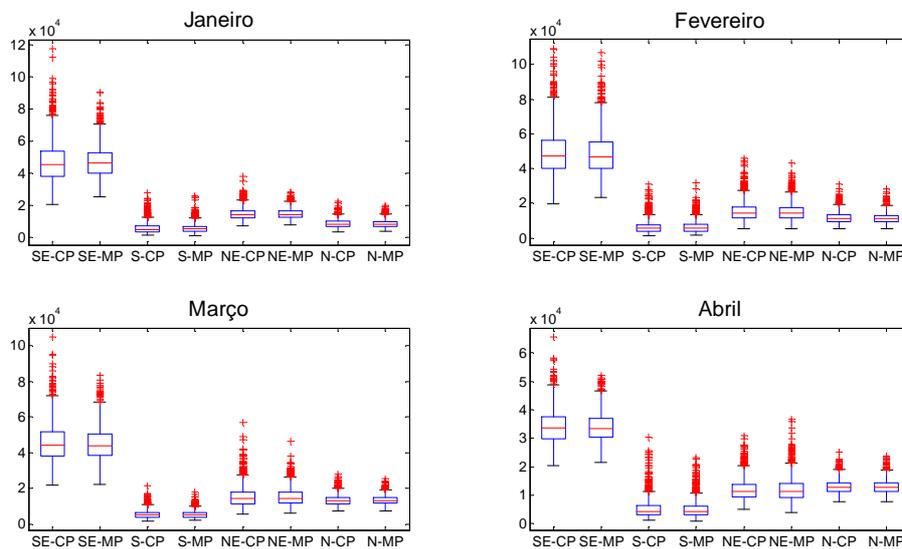
planejamento de médio prazo. As retas de regressão linear possuem inclinações de aproximadamente 45 graus ($a \approx 1$).

Os maiores desvios correspondem às afluições muito elevadas que apresentam baixa probabilidade de ocorrência. Pode-se observar que o modelo utilizado para gerar as séries de *Energia de Médio Prazo* não gera valores tão extremos, porém esses cenários têm pouco impacto no cálculo da política de operação, pois não levam ao despacho de geração térmica e ao não atendimento ao mercado de energia.

5.3 - Gráfico Box Plot

Nesta seção as séries geradas de *Energia de Médio Prazo* e *Energia de Curto Prazo* são comparadas através de gráficos Box-Plot (ou diagrama de caixa). Este gráfico apresenta os valores centrais dos dados e alguma informação a respeito da amplitude deles.

Na figura 7 são apresentadas as comparações entre *Energia de Curto Prazo (CP)* e *Energia de Médio Prazo (MP)*, para todos os subsistemas e para todos os meses. Note que os diagramas são bem similares, exceto por algumas séries de afluições extremas (cenários altos), conforme já havia sido comentado na seção anterior. Desta forma, pode-se verificar há compatibilidade entre as séries geradas.



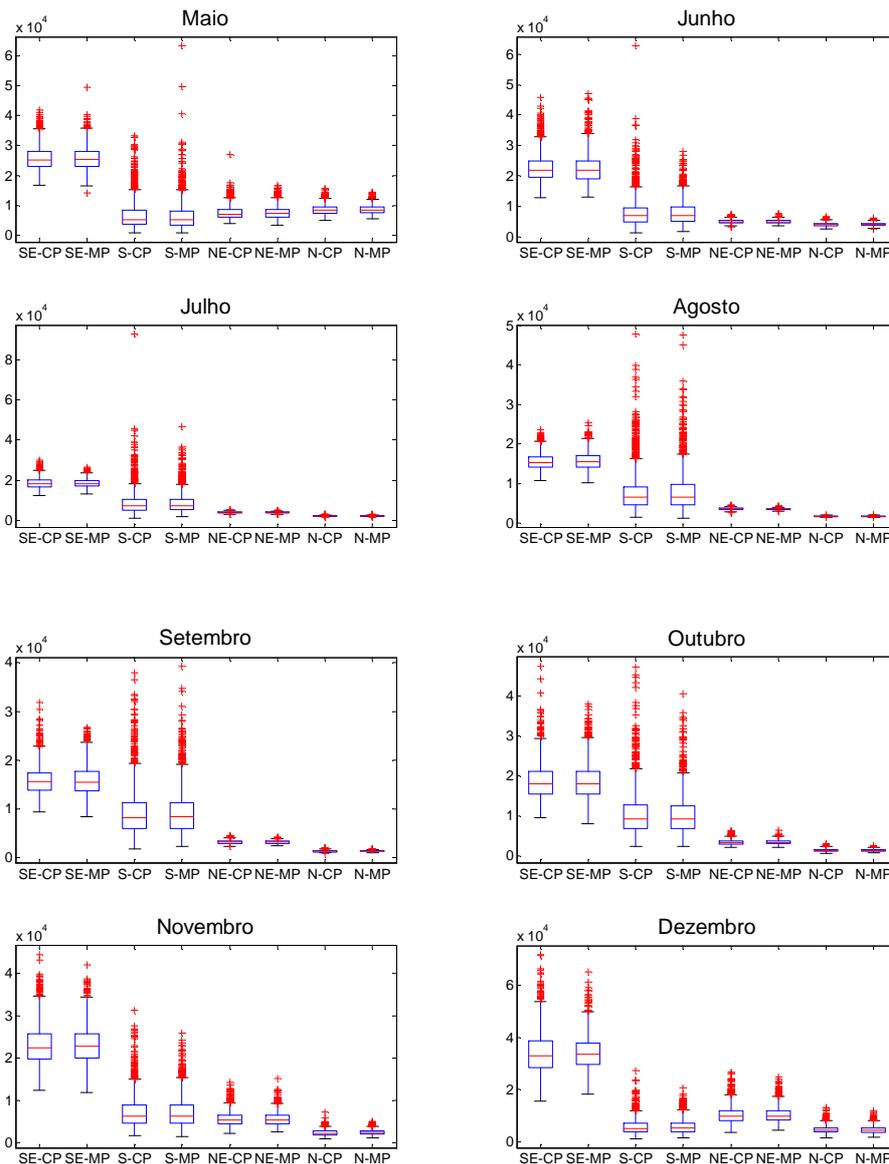


Figura 7 – Box Plot das séries geradas

A seguir é realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, Seigel (1975), para as distribuições de energias geradas para os meses de fevereiro, junho e novembro de 2007.

5.4 - Função de distribuição acumulada

O teste de Kolmogorov-Smirnov 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 nas figuras 8a a 8l o *P*-valor e a máxima diferença (*MaxDif*) entre as distribuições acumuladas de probabilidades para todos quatro os subsistemas e para todos os meses.

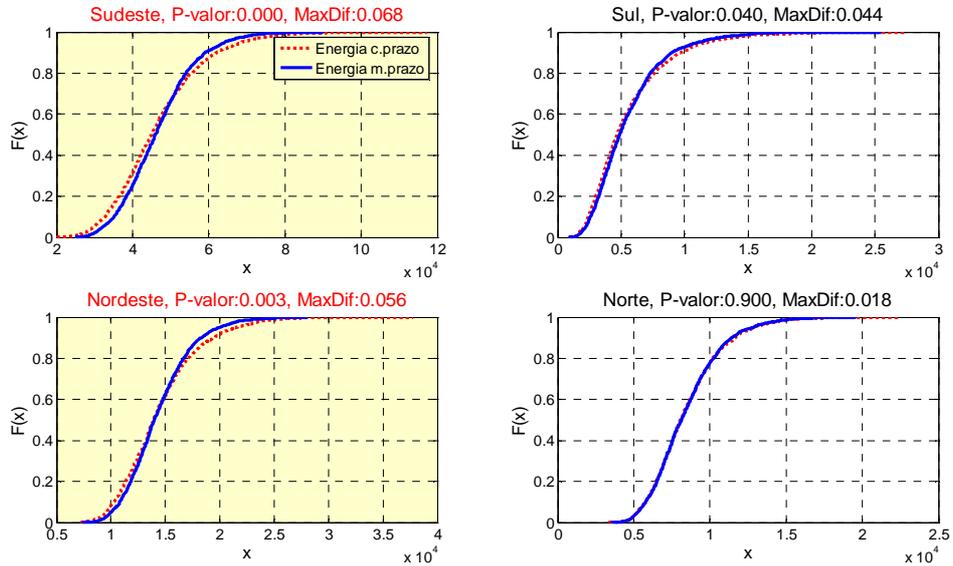


Figura 8a – Funções de Distribuição Acumulada (janeiro)

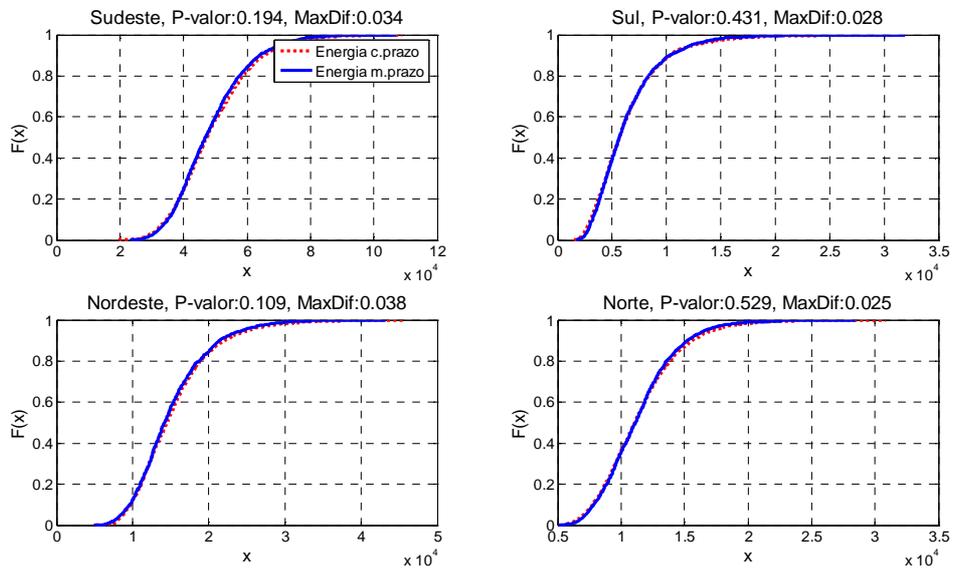


Figura 8b – Funções de Distribuição Acumulada (fevereiro)

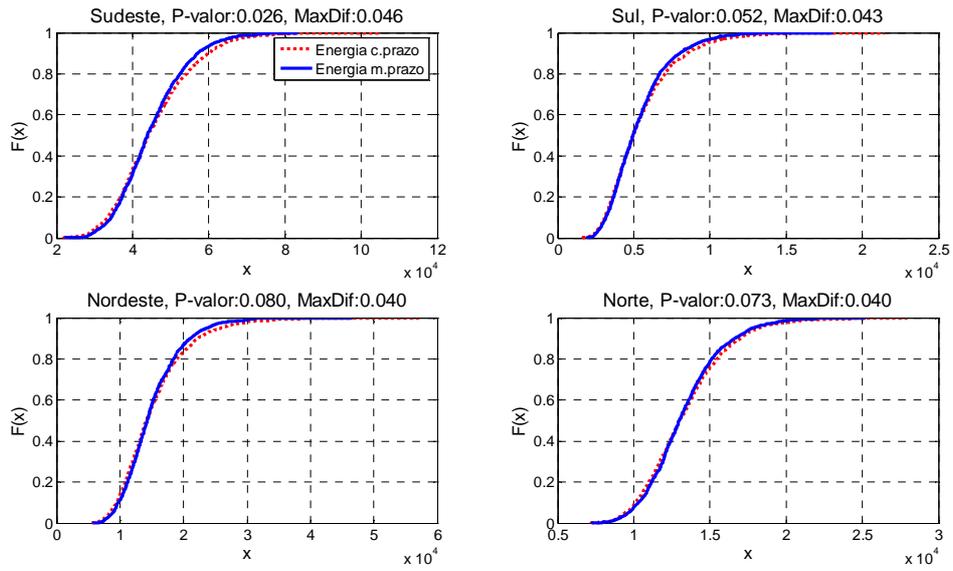


Figura 8c – Funções de Distribuição Acumulada (março)

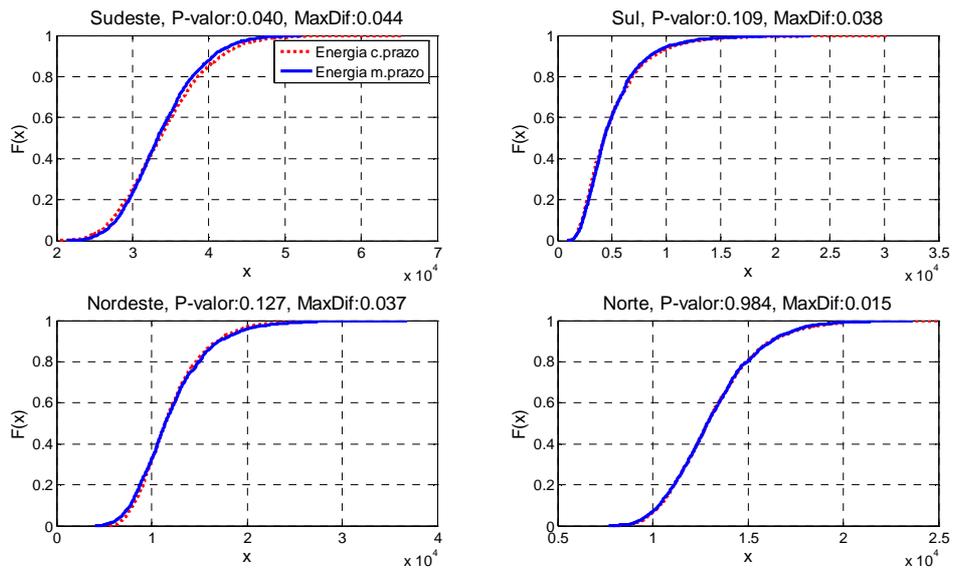


Figura 8d – Funções de Distribuição Acumulada (abril)

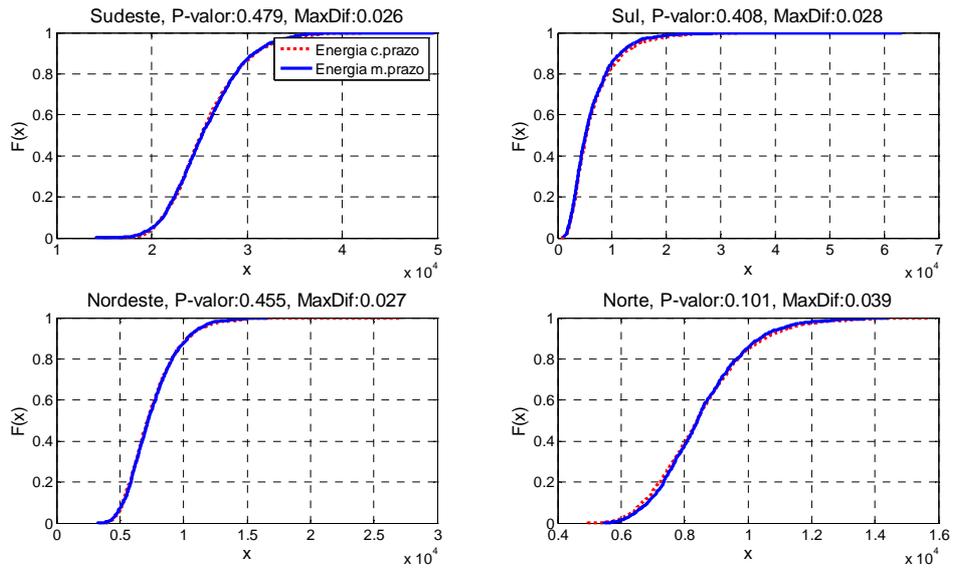


Figura 8e – Funções de Distribuição Acumulada (maio)

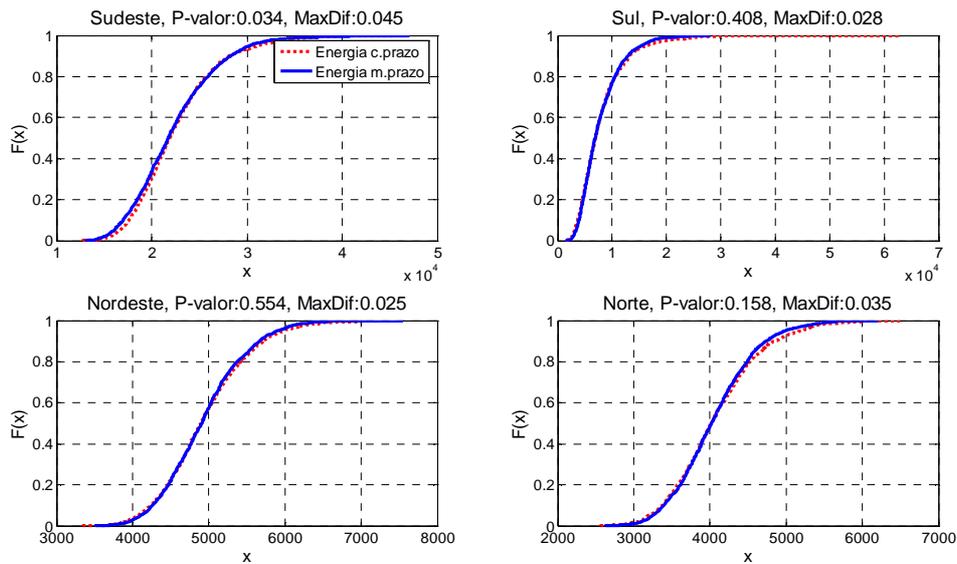


Figura 8f – Funções de Distribuição Acumulada (junho)

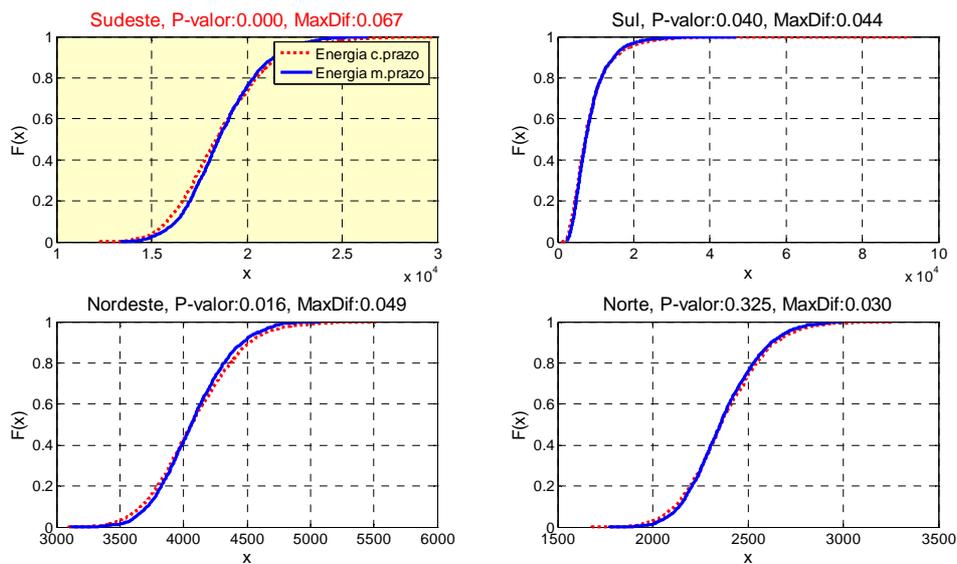


Figura 8g – Funções de Distribuição Acumulada (julho)

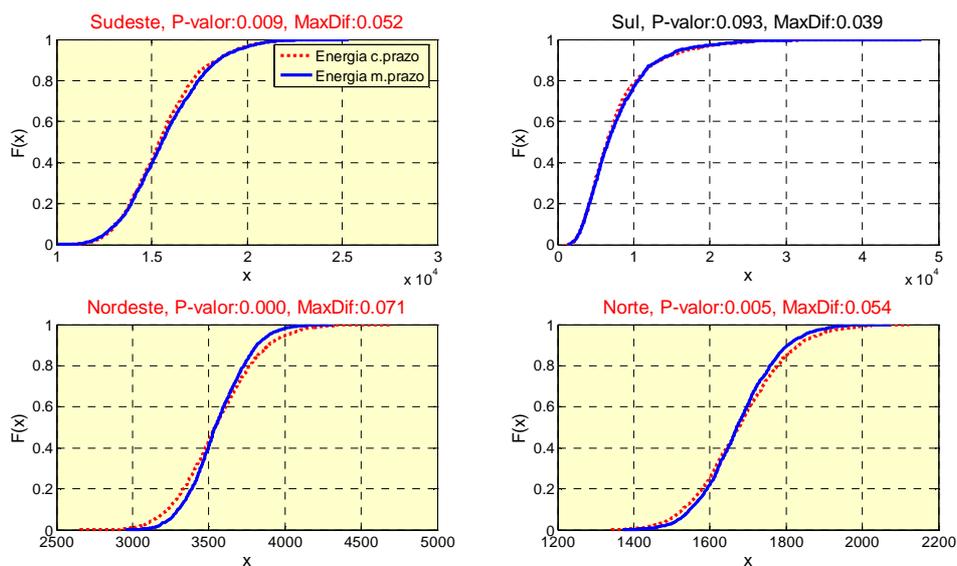


Figura 8h – Funções de Distribuição Acumulada (agosto)

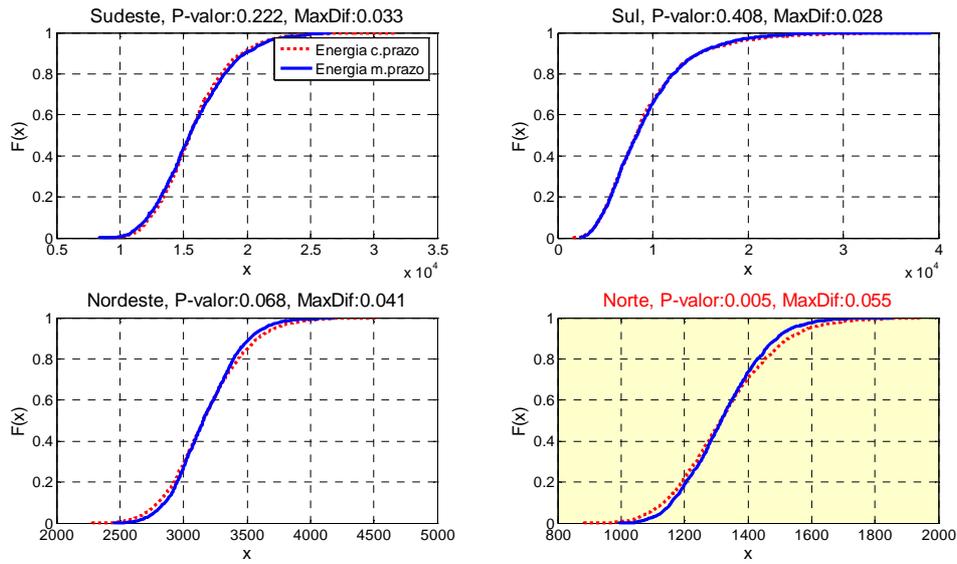


Figura 8i – Funções de Distribuição Acumulada (setembro)

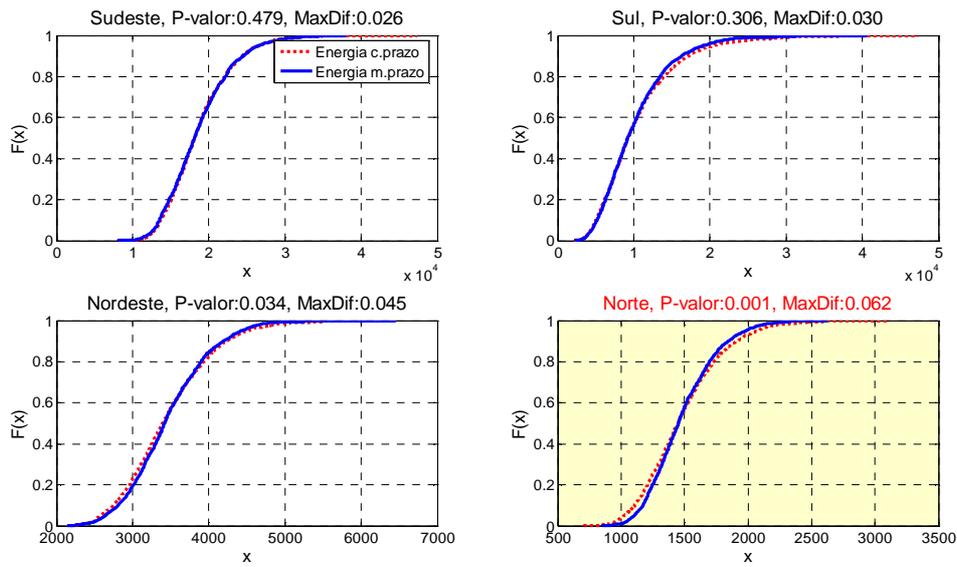


Figura 8j – Funções de Distribuição Acumulada (outubro)

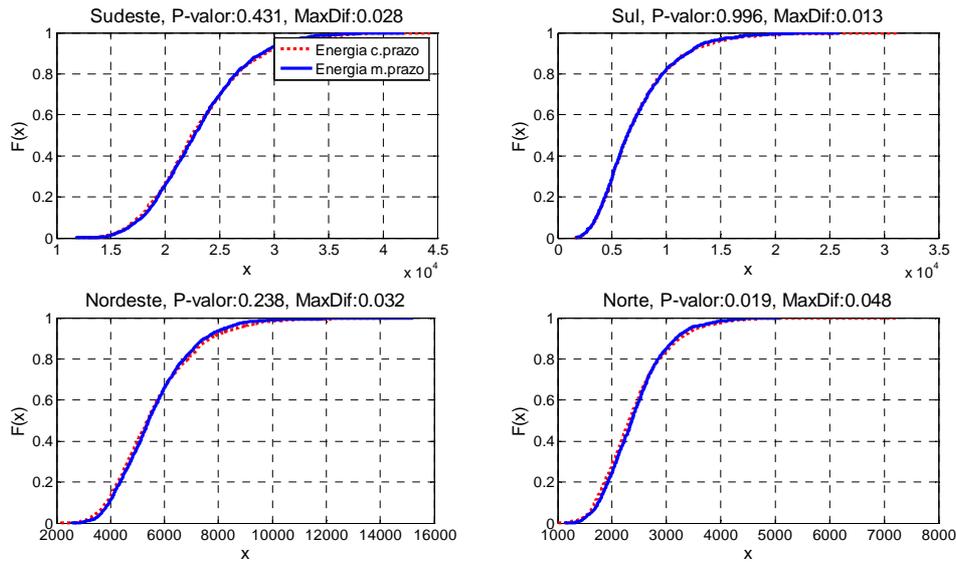


Figura 8k – Funções de Distribuição Acumulada (novembro)

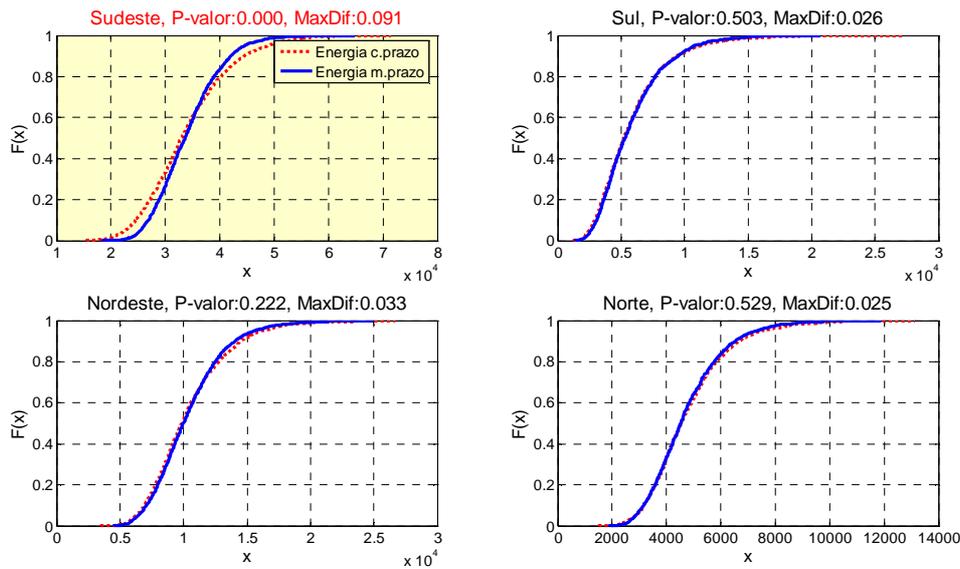


Figura 8l – Funções de Distribuição Acumulada (dezembro)

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 8. Como pode ser verificado, para a grande maioria dos testes 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 é aceita, a um nível de significância de 1% ($P\text{-valor} \geq 0.01$),

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.

5.5 - Comparação das séries geradas

Nas figuras 9a a 9l são apresentadas as 2000 séries geradas de *Energias de Curto Prazo* (retas pretas), justapostas às 2000 séries geradas de *Energias de Médio Prazo* (retas cinzas), para os quatro subsistemas e para todos os meses.

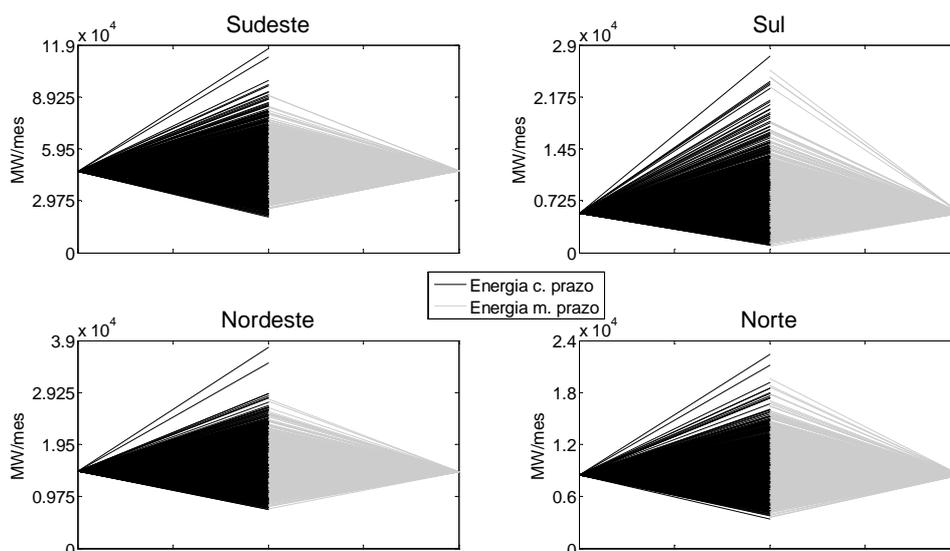


Figura 9a – Comparação Séries Geradas (janeiro)

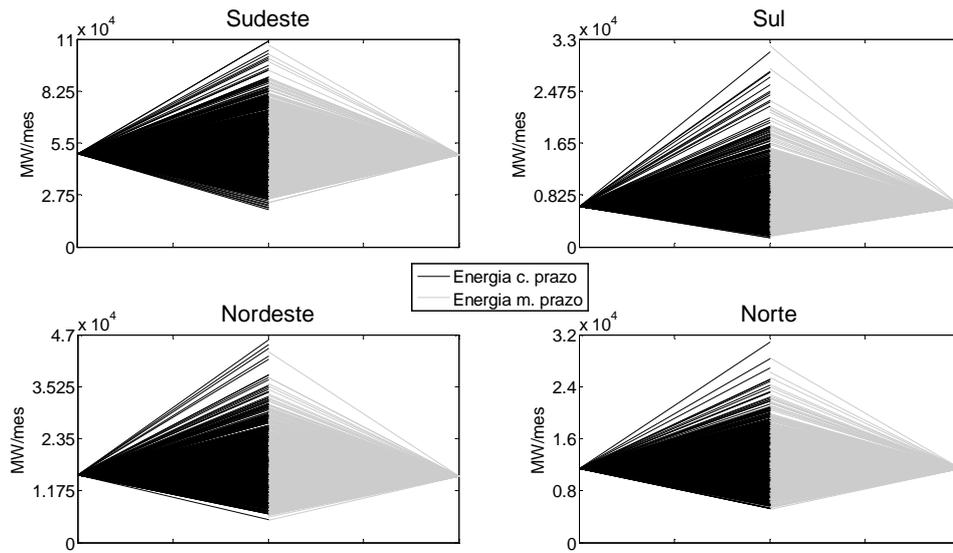


Figura 9b – Comparação Séries Geradas (fevereiro)

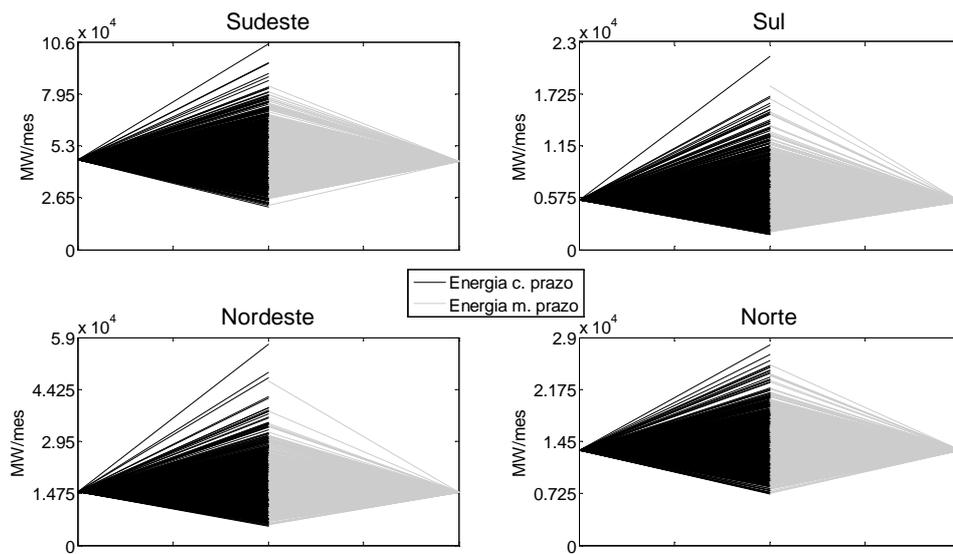


Figura 9c – Comparação Séries Geradas (março)

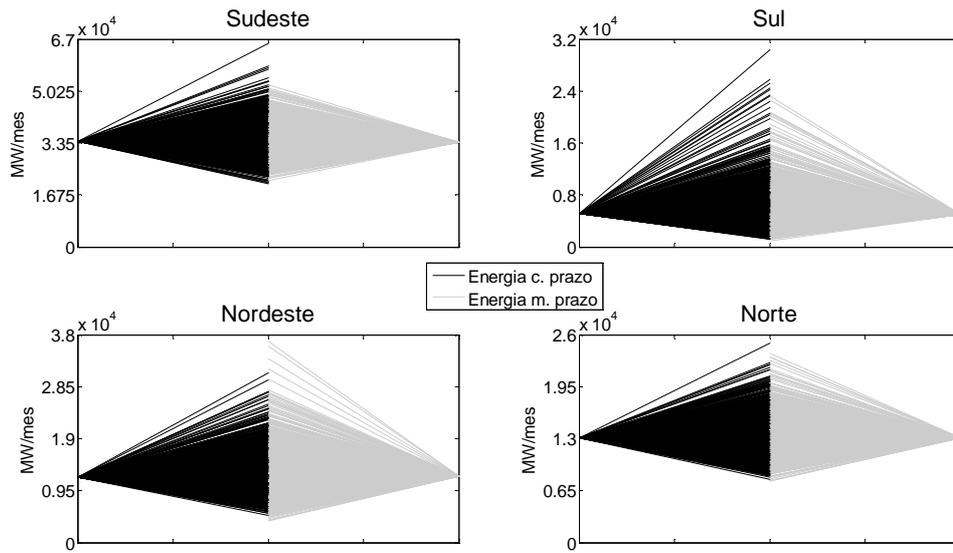


Figura 9d – Comparação Séries Geradas (abril)

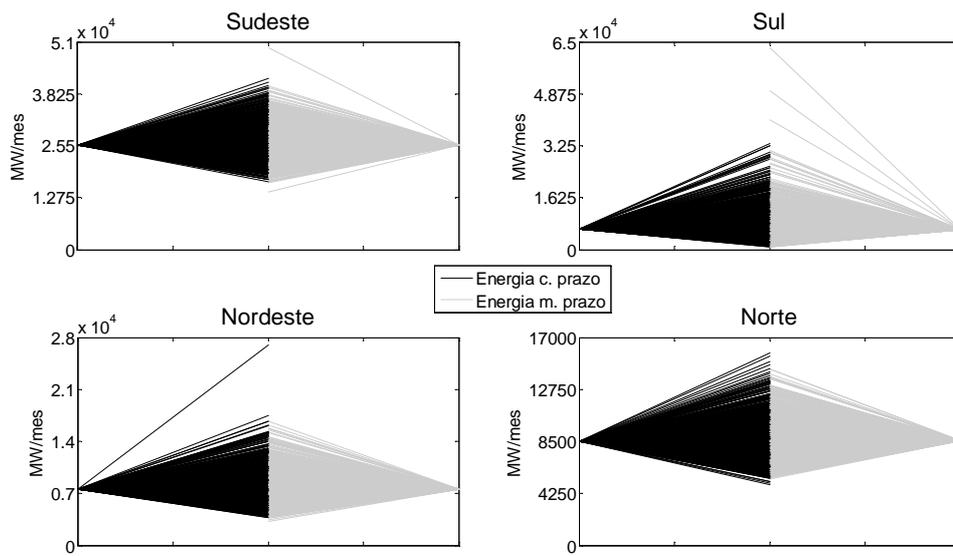


Figura 9e – Comparação Séries Geradas (maio)

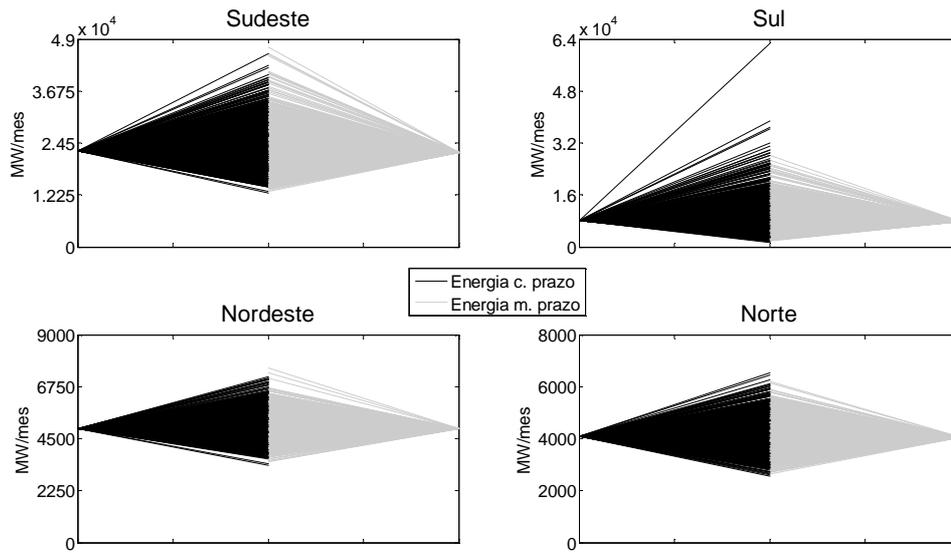


Figura 9f – Comparação Séries Geradas (junho)

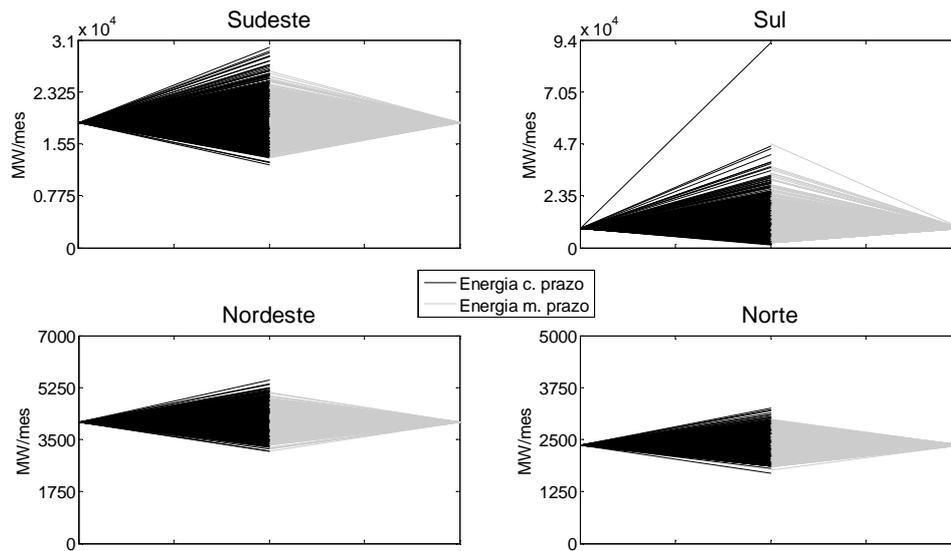


Figura 9g – Comparação Séries Geradas (julho)

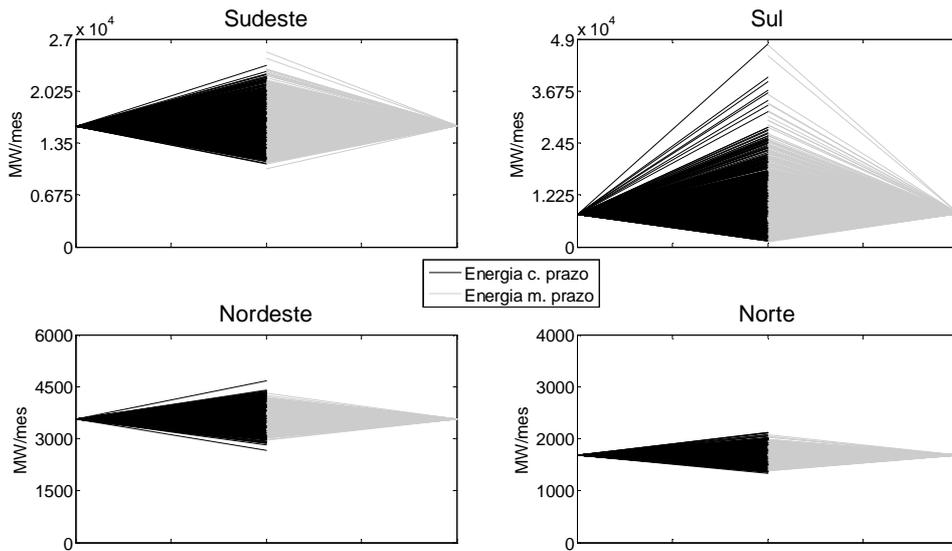


Figura 9h – Comparação Séries Geradas (agosto)

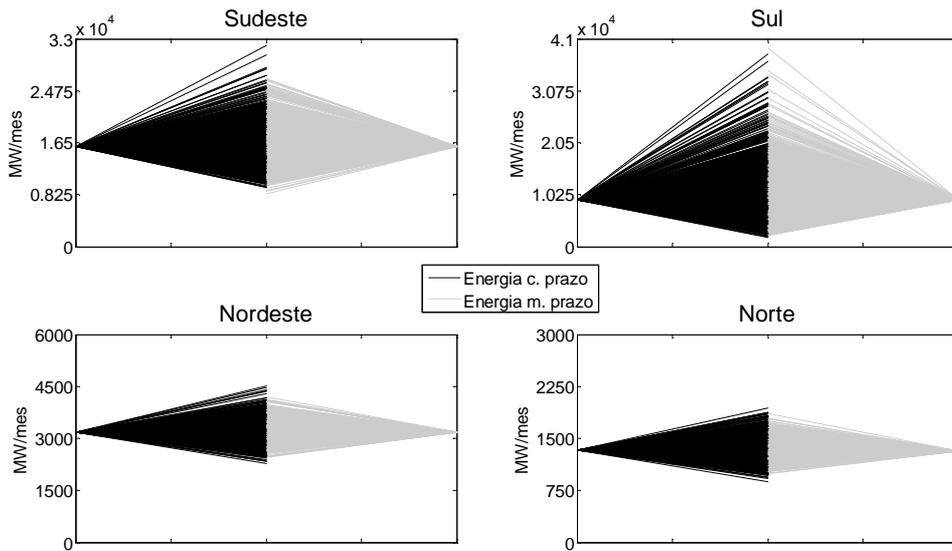


Figura 9i – Comparação Séries Geradas (setembro)

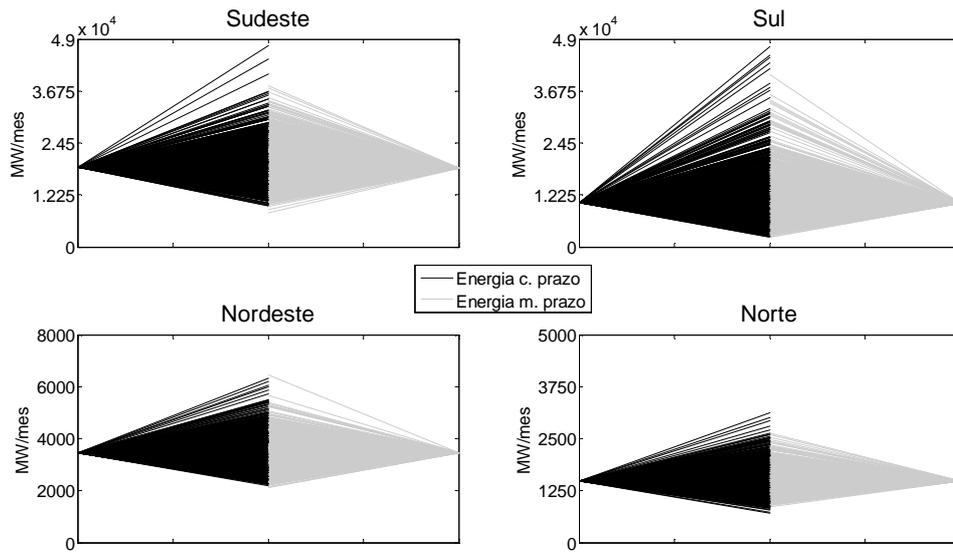


Figura 9j – Comparação Séries Geradas (outubro)

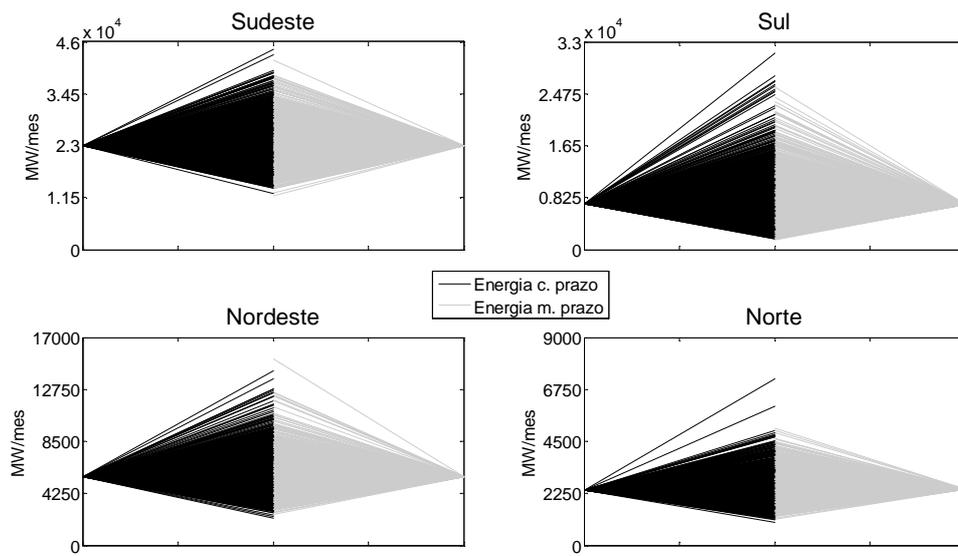


Figura 9k – Comparação Séries Geradas (novembro)

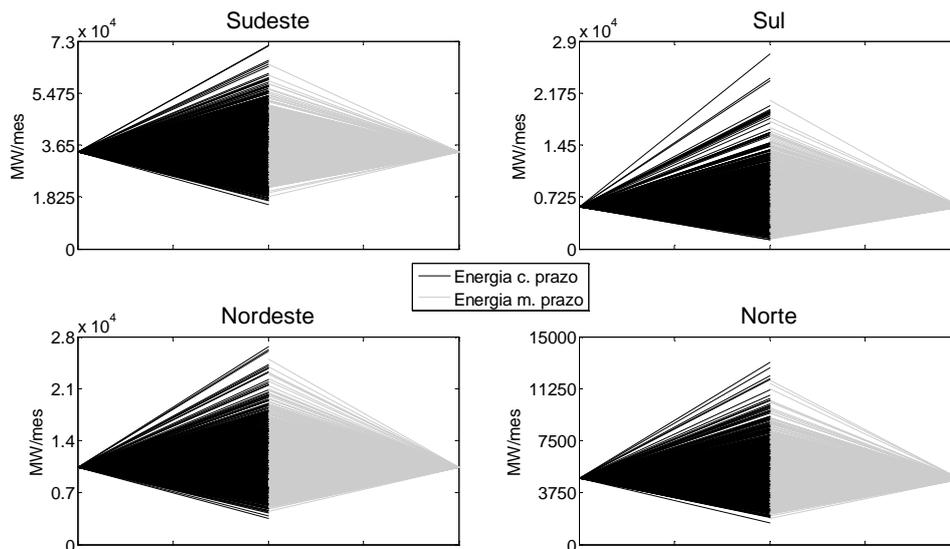


Figura 91 – Comparação Séries Geradas (dezembro)

Pode-se notar que em geral o intervalo abrangido pelas séries geradas é, praticamente, o mesmo para as energias de curto e médio prazos. Em alguns casos o intervalo abrangido pelas energias de médio prazo é mais amplo, por exemplo, para o mês de maio e subsistema Sul. Em contra partida, a situação inversa também é verificada, como mostrado para o mês de junho e, novamente, subsistema Sul. Vale ressaltar que estas diferenças são pouco prováveis, visto que a probabilidade de ocorrência de cada valor é 0,0005.

5.6 - Comparação das correlações cruzadas

Na figura 10 é apresentada uma comparação entre as correlações cruzadas calculadas a partir das 2000 séries geradas de energias de médio prazo e de energia de curto prazo, para cada par de subsistemas (SE-S, SE-NE, SE-N, S-NE, S-N e NE-N). A linha tracejada indica uma reta com ângulo igual 45° e passando pela origem, isto é, quanto mais próximos os pontos estiverem desta linha maior a proximidade da representação da correlação cruzada nas séries de energia de médio e curto prazo. Pode ser observado que, em geral, a representatividade das correlações cruzadas é mantida de maneira bastante satisfatória. Isto pode ser confirmado pelo coeficiente angular ($a=0,985$) e o coeficiente de determinação ($R^2=94,57\%$) de uma reta ajustada aos pontos do gráfico da figura 10.

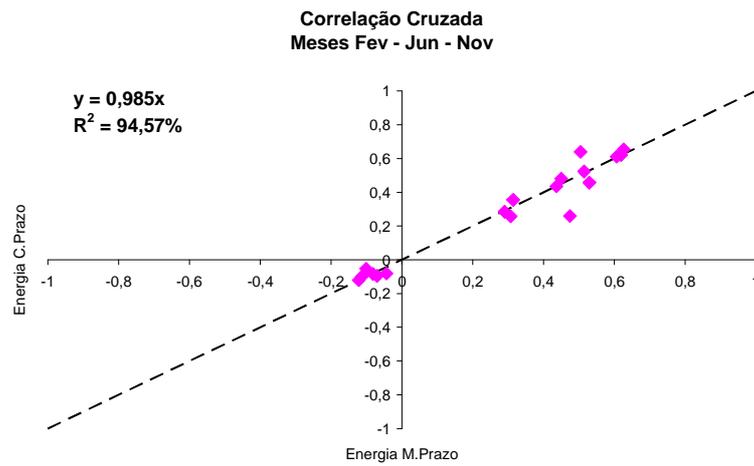


Figura 10 – Comparação Correlação Cruzada.

Com base nos bons resultados fornecidos pelos testes estatísticos realizados nesta seção, encerra-se este trabalho com as principais conclusões.

6 - CONCLUSÕES

Neste relatório foi realizado um estudo a cerca da compatibilidade entre o processo estocástico de vazões afluentes e o processo estocástico de energias naturais afluentes. Essa compatibilidade 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.

Para analisar a compatibilidade entre as séries de energia de curto e médio prazo, foram realizadas análises estatística da média e do desvio-padrão, testes de aderência das distribuições, comparações entre a correlação cruzada das séries geradas, dentre outras análises envolvendo diretamente os valores gerados.

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, pelos gráficos das distribuições acumuladas das séries sintéticas geradas, pela análise estatística da média e desvio-padrão.

Em geral o modelo utilizado para geração de curto prazo gera valores extremos mais altos do que o modelo utilizado no médio prazo. Porém isto não impacta o cálculo da política de operação, pois cenários altos não proporcionam aumento no custo total de operação.

BIBLIOGRAFIA

DAMAZIO, J.M.; MACEIRA, M.E.P.; PENNA, D.D.J; OLIVEIRA, W.L. (2008) “*Validation of streamflow scenarios for scheduling in the Brazilian hydrothermal electric generation system*”. International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management, HydroPredict 2008, Prague, Czech Republic, September 15-18, pp 345-348.

DINIZ, A. L., SANTOS, T. N., MACEIRA, M. E. P. (2006). “*Short term security constrained hydrothermal scheduling for large scale systems considering transmission losses*”, IEEE/PES Transm. Distr. Conf. Expos. Latin America, Caracas, Venezuela, pp 2-6.

GUJARATI, D.N.(2000). “*Econometria Básica*”. Makron Books, 3th ed. pp. 64-70.

JARDIM, D.L.D.D.; MACEIRA, M.E.P.; FALCÃO, D.M. (2001). “*Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems Using Clustering Techniques*” In Anais do IEEE Porto Power Tech Conference, vol.3, Porto, Portugal, Sep., pp 3-5.

MACEIRA, M.E.P.; BEZERRA, C.V. (1997). “*Stochastic Streamflow model for Hydroelectric Systems*” In: Proceedings of 5th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Vancouver, Canada, Sep., pp. 305-310.

MACEIRA, M.E.P.; CUNHA, S.H.F. (1995). “*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.

MACEIRA, M.E.P.; JARDIM, D.L.D.D. (2000). “*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.

MACEIRA, M. E. P.; PENNA, D.D.J.; DAMÁZIO, J.M. (2005). “*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, pp. 3-12.

MACEIRA, M.E.P.; TERRY, L.A.; DAMÁZIO, J.M.; COSTA, F.S., MELO, A.C.G. (2002). “*Chain of Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System, Power*” System Computation Conference – PSCC’02, Sevilla, Spain, June 24-28, pp. 1-4.

MACEIRA, M.E.P.; DUARTE, V.S., PENNA, D.D.J., MORAES, L.A.M., MELO, A.C.G. (2008). “*Ten Years of application of stochastic dual dynamic programming in official and agent studies in Brazil – description of the NEWAVE program*”, Proceedings of 16 th Power Systems Computation Conference, Glasgow, Scotland.

SEIGEL, S. (1975). *Estatística Não Paramétrica*, São Paulo, Mc Graw-Hill. pp. 144-155.

XAVIER, L.N., DINIZ, A.L.S., COSTA, F.S., MACEIRA, M.E. (2005). “*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.*