

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL



Relatório Técnico

Nº/Ano: 10783/2018 **Nº de Páginas:** 22 **Nº de Anexos:** 00

Título: Análise da inflexão do custo marginal de operação no modelo NEWAVE entre os quarto e quinto estágios temporais ao se adotar a representação de 12 REEs para Sistema Interligado Nacional

Departamento: Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

Área de Responsabilidade: B200 **Contas de Apropriação:** 1345/1798

Cliente:
Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico - CPAMP

Resumo: Este relatório tem como objetivo aprofundar a análise relativa à variação amostral na representação da árvore de cenários de afluências gerada pelo modelo GEVAZP e empregada pelo modelo NEWAVE. Em particular, avalia-se o impacto no comportamento de queda do CMO entre os 4º e 5º estágios ao se adotar a representação da configuração hidroelétrica por doze reservatórios equivalentes de energia, que foi observado nos estudos da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP), conduzidos nos anos de 2017 e 2018.

Autores:
Débora Dias Jardim Penna – CEPEL
Maria Elvira Piñeiro Maceira – CEPEL
Jorge Machado Damázio - CEPEL
Felipe Treistman – PUC-Rio
Hugo Santarém de Araújo – CEPEL
Albert C. Geber de Melo - CEPEL

Palavras-Chave:
Geração de Cenários de Afluências, Variabilidade Amostral, Programação Dinâmica Dual Estocástica, Planejamento da Operação de Longo/Médio Prazo

Classificação: CONTROLADO

Gerentes dos Projetos

Nome: Maria Elvira Piñeiro Maceira
Tel.: 21-2598-6454
E-mail: elvira@cepel.br

Nome: Débora Dias Jardim Penna
Tel.: 21-2598-6450
Email: debora@cepel.br

Chefe do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente

Nome: André Luiz Diniz Souto Lima
Tel.: 21-2598-6046

E-mail: diniz@cepel.br

Aprovação

Raul Balbi Soffero
Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
28/12/2018

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

PROJETOS NEWAVE e GEVAZP

Relatório Técnico

**Análise da inflexão do custo marginal de operação no modelo
NEWAVE entre os quarto e quinto estágios temporais ao se
adotar a representação de 12 REEs para o Sistema Interligado
Nacional**

Setembro de 2018

ÍNDICE

1	Introdução	2
2	Análise do processo de geração.....	6
2.1	Análise do ruído aleatório não correlacionado	8
2.2	Análise do ruído aleatório correlacionado	10
2.3	Análise da ENA <i>backward</i>	11
2.4	Análise da ENA <i>backward</i> com resorteio de ruídos aleatórios	14
3	Análise do Valor da Água.....	18
4	Conclusões	20
5	Referências.....	21

1 Introdução

Um dos maiores desafios no gerenciamento de recursos hídricos para geração de energia elétrica é a forma como se considera a variabilidade natural dos processos hidrológicos. Dentro desse escopo, a busca por formas adequadas de se representar essa variabilidade observada nas vazões naturais resulta na concepção de modelos estocásticos para modelar a afluência das usinas hidrelétricas (UHE). Uma vez definidos esses modelos estocásticos, é possível gerar uma grande quantidade de sequências hidrológicas tão equiprováveis quanto a série histórica, porém, com realizações distintas. Esse conjunto de novas sequências sintéticas – chamado de cenários – explora trajetórias prováveis do processo estocástico hidrológico que capturam o comportamento da série histórica e expressam o risco associado ao gerenciamento dos recursos hídricos [1] [2]. O conjunto de todas as possíveis realizações do processo estocástico de afluências forma uma árvore de cenários.

Dentre as instâncias nas quais estes cenários desempenham seu papel de expressar a variabilidade natural das afluências, pode-se destacar seu uso no planejamento da operação energética a curto e médio/longo prazo, [3][4][5][6][7], cujo objetivo principal é definir a alocação de recursos hídricos e térmicos de forma ótima considerando a minimização do valor esperado do custo total de operação e a segurança energética do sistema. Atualmente, o problema de planejamento da operação energética do sistema interligado nacional de médio/longo prazo, resolvido pelo modelo NEWAVE [6] e [7], é representado por um problema de programação estocástica linear multiestágio e o método aplicado para construção da política é a Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) [8], levando-se em conta a correlação temporal das afluências aos reservatórios [11]. Assim, consideram-se como variáveis de estado do problema o armazenamento no início do período e as afluências passadas (tendência hidrológica). A incerteza hidrológica é representada explicitamente através de cenários de afluências construídos sinteticamente empregando-se um modelo autorregressivo periódico [1] e um processo de amostragem seletiva [9][2].

Os primeiros métodos de decomposição desenvolvidos para resolver problemas de programação linear estocástico percorriam a árvore de cenários em sua totalidade (árvore completa), porém para problemas onde a árvore de cenários apresenta uma cardinalidade elevada, percorrê-la em sua totalidade é impossível do ponto de vista computacional ou prático. Para contornar este problema foram desenvolvidos diversos métodos que utilizam técnicas de amostragens para selecionar uma subárvore de cenários com tamanho reduzido. O primeiro método a fazer uso da

amostragem em programação estocástica foi a PDDE, cujas subárvores *forward* e *backward* utilizadas durante seu processo de solução estão ilustradas na Figura 1.

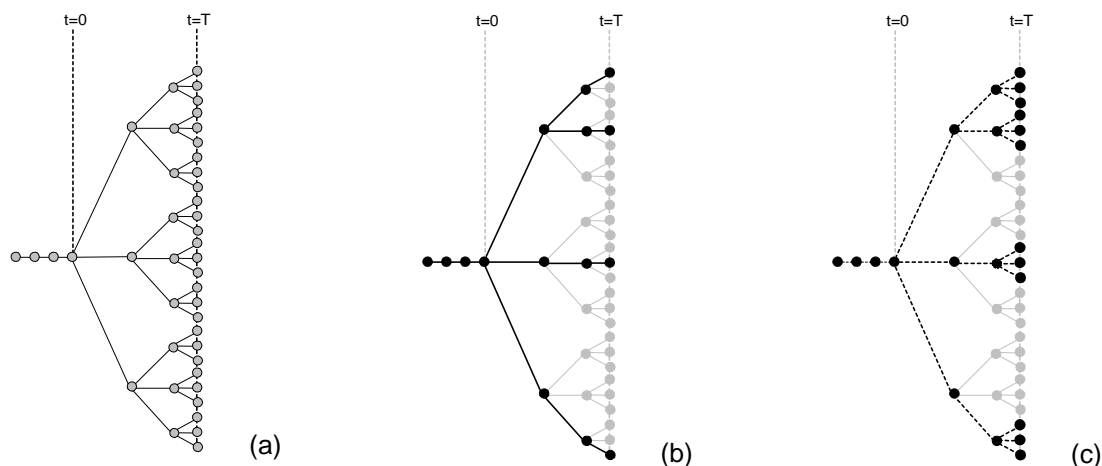


Figura 1: (a) árvore completa (b) subárvore *forward* (c) subárvore *backward*

Atualmente no NEWAVE, a representação da incerteza futura é dada por um conjunto de 20 possíveis cenários (componentes aleatórios que irão ser utilizados para gerar os cenários de afluições) para cada estágio de tempo. Usualmente, este conjunto de cenários é chamado de “aberturas”.

A subárvore *forward* é o conjunto de cenários amostrados da árvore completa de cenários, atualmente se considera 200 cenários. Esta subárvore pode ser constante ao longo das iterações da PDDE ou pode ser reamostrada durante o processo iterativo da PDDE (reamostragem de cenários *forward*) [14]. As análises constantes deste relatório não consideram a reamostragem de cenários.

A subárvore *backward* é dada pelo conjunto de cenários que serão utilizados nos problemas de programação linear do passo *backward* do algoritmo da PDDE para produzir cortes de Benders médios para a função de custo futuro (FCF) em cada estágio do horizonte de planejamento. De forma geral, para cada estágio de tempo são visitados 200 estados, e para cada estado são resolvidos 20 problemas de despacho ótimo resultando em um corte de Benders médio a ser incluído na FCF. No modelo NEWAVE, um estado é representado pelo nível de armazenamento em cada reservatório equivalente de energia (REE)/usina hidroelétrica (UHE) e pelas afluições passadas aos REEs/UHEs.

O processo de solução iterativa da PDDE compreende dois passos principais que são executados ao longo de todo o horizonte de estudo:

- passo *backward*: realiza uma simulação recursiva cujo objetivo é produzir os cortes de Benders, que correspondem a uma aproximação inferior da função de custo futuro para cada estágio, a partir dos estados fornecidos pelo passo *forward*.
- passo *forward*: realiza uma simulação direta e resolve um conjunto de problemas de programação linear para cada estágio de tempo. O objetivo deste passo é produzir alguns caminhos de operação possíveis (estados de armazenamento), que cumprem todas as restrições do problema de programação linear estocástica. O custo médio ao longo de todos os caminhos da operação fornece o valor esperado do custo total de operação. O passo *forward* fornece a convergência do algoritmo PDDE.

Depois de calcular a política ótima de operação, são simulados 2000 cenários sintéticos de energia natural afluyente (ENA) para estimar os índices de desempenho probabilístico do sistema, como risco de déficit, energia esperada não suprida, e intercâmbios entre sistemas [7].

No modelo NEWAVE, a representação do parque hidráulico pode ser feita de forma agregada, agrupando-se usinas hidroelétricas em reservatórios equivalentes de energia [16] de acordo com sua localização dentro do Sistema Interligado Nacional (SIN). Depois de agrupadas, toda a vazão natural afluyente a cada UHE é transformada em energia natural equivalente (ENA) aos REEs. Até 2015 a representação do SIN era feita com 4 REEs, em 2017 com base em uma representação mais refinada [17] passou-se a adotar 9 REEs. Desde 2018, a representação do SIN é composta por 12 REEs.

Durante o processo de validação da mudança de configuração do SIN, de 9 para 12 REEs, realizada no âmbito dos trabalhos do Subgrupo de Metodologia da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP/GT-Metodologia), foram rodados os casos de PMO do ano de 2017 com a nova representação dos REEs. A partir destas análises, observou-se um comportamento de redução do custo marginal de operação obtido nas simulações finais na configuração com maior número de REEs. No Relatório Técnico 27538/2017 intitulado “Análise do comportamento do custo marginal de operação do modelo NEWAVE ao se passar de 9 para 12 reservatórios equivalentes de energia” de dezembro de 2017 [13], o CEPEL analisou a variação dos custos marginais de operação calculados pelo modelo NEWAVE, verificada nos PMOs de Setembro e Outubro de 2017, quando se passava de uma representação do parque hidroelétrico de 9 para 12 REEs. Foram identificadas como causas para o comportamento do custo marginal de operação (CMO): (i) complementaridade hidrológica entre os REEs Paraná e Paranapanema; (ii) aumento da geração não armazenável devido à baixa capacidade de armazenamento do REE Paranapanema; (iii) variação amostral na representação da árvore de cenários de aflúências no algoritmo da PDDE.

O presente relatório tem como objetivo aprofundar a análise relativa à variação amostral na representação da árvore de cenários de afluências e avaliar seu impacto no comportamento de queda do CMO entre os 4º e 5º estágios, conforme ilustrado na Figura 2 para o PMO de Setembro de 2017. Como usualmente uma redução nos valores de CMOs está relacionada a uma perspectiva futura de afluências elevadas, considerando um dado nível de armazenamento, será feita uma investigação no comportamento das ENAs, com foco nos estágios em que foi observada a descontinuidade da evolução do CMO médio. A avaliação dos cenários de ENAs será feita desde a etapa da geração dos ruídos independentes até finalmente a obtenção dos cenários hidrológicos propriamente ditos.

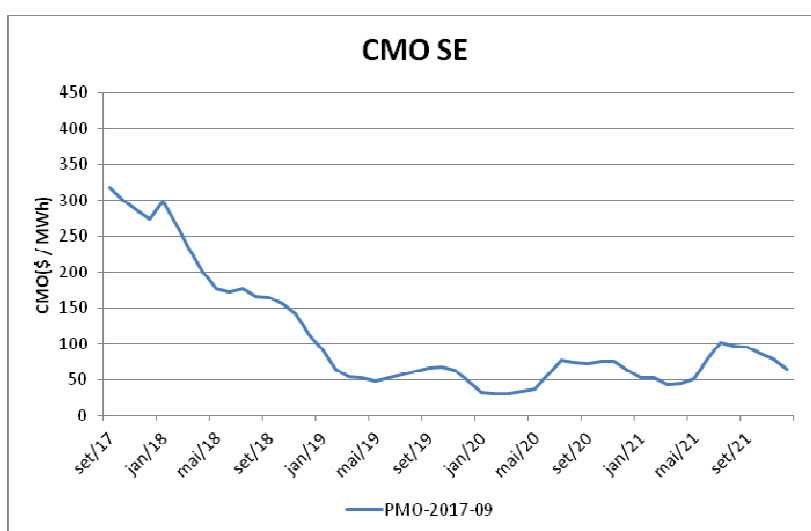


Figura 2 – Evolução do CMO médio mensal – Mercado SE – PMO SET/2017.

Esse relatório é organizado da seguinte forma: nesta seção, fez-se a introdução do comportamento observado na evolução do CMO médio quando se considera 12 REEs no Programa Mensal de Operação. A seção 2 trata dos detalhes sobre o processo de geração de cenários de ENA, destacando a parcela aleatória em suas formas não-correlacionada e correlacionada. Além disso, a seção 2 também trará os impactos do sorteio de ruídos aleatórios na construção da ENA do passo *backward*, que afeta diretamente o cálculo da política de operação. A seção 3 apresenta uma análise do valor da água nos períodos onde se observa a queda do valor do CMO médio e, por fim, a seção 4 traz as conclusões e possíveis futuros trabalhos.

2 Análise do processo de geração

O modelo GEVAZP é responsável pela geração de cenários sintéticos multivariados de energia e vazão mensais. Esse cenários são essenciais para o cálculo da política de operação ótima no problema otimização multi-estágio e multi-reservatório do SIN [1][2].

Para desempenhar essa tarefa, o modelo GEVAZP adota em sua modelagem estocástica a família de modelos autorregressivos periódicos de ordem p , PAR(P) [1][10]. A escolha desse modelo é justificada pela sua capacidade de capturar o comportamento periódico observado comumente em séries de afluência mensais. O modelo PAR(p) pode ser descrito matematicamente pela equação 2.1:

$$\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \varphi_1^m \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \varphi_{pm}^m \left(\frac{Z_{t-pm} - \mu_{m-pm}}{\sigma_{m-pm}}\right) + a_t \quad (2.1)$$

Onde:

Z_t é a série hidrológica sazonal de período T ;

N é número de anos;

T é o índice de tempo, $t = 1, 2, \dots, sN$; função do ano T ($T = 1, 2, \dots, N$) e do período m ($m = 1, 2, \dots, s$);

s é o número de períodos ($s = 12$ para séries mensais);

μ_m é a média sazonal do período s ;

σ_m é o desvio padrão sazonal do período s ;

φ_i^m é o i -ésimo coeficiente autorregressivo do período m ;

p_m é a ordem do operador de defasagem de período m ;

a_t é a série de ruídos independentes com média zero e variância σ_a^{2m}

Usualmente, assume-se que os ruídos a_t na equação (2.1) possuem distribuição normal e são independentes e identicamente distribuídos. Se for constatada a não normalidade dos ruídos, pode-se aplicar a transformação Box-Cox [12]. No caso da modelagem de afluências feita pelo modelo GEVAZP, emprega-se a série histórica original sem transformação e, conseqüentemente, deve-se modelar ruídos que demonstram uma distribuição assimétrica, como a distribuição lognormal.

A Figura 3 ilustra os passos necessários para geração de ruídos lognormais correlacionados espacialmente como executado pelo modelo NEWAVE.

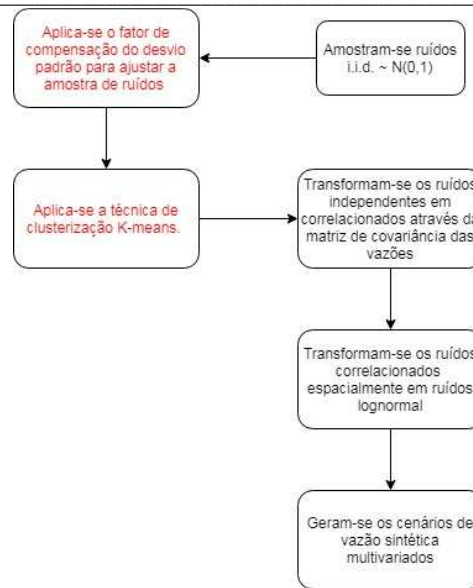


Figura 3 - Processo de geração de ruídos como feito pelo modelo GEVAZP para a PDDE.

Inicialmente gera-se uma amostra de 100 mil vetores de ruídos aleatórios independentes $\sim N(0,1)$, onde cada componente do vetor de ruídos independentes corresponde a uma UHE ou REE. A esta amostra inicial dá-se o nome de amostra original. Depois de gerados, os vetores de ruídos independentes são agregados através da técnica de agregação K-means. Técnicas de agregação como a K-means servem para diminuir a dimensionalidade dos dados enquanto se preserva a exploração do espaço amostral [9]. É sabido que este procedimento tende a diminuir o desvio padrão da amostra de ruídos resultante. Por isso, antes da agregação, o desvio padrão das amostras é ajustado por um fator de correção, cujo objetivo é aumentar o desvio padrão da amostra original. Somente depois dessa correção, os vetores de ruídos são agregados. Depois dessa etapa, os ruídos independentes passam a ser correlacionados espacialmente através da imposição da correlação observada nas vazões/ENAs históricas sobre os ruídos resultantes da agregação. Essa correlação imposta aos ruídos garante a multivariabilidade dos cenários sintéticos gerados de vazões/ENAs.

Uma vez correlacionados espacialmente, os ruídos aleatórios ainda normais são transformados em ruídos log-normais com 3 parâmetros [15], com o objetivo de evitar a geração de valores negativos de afluência. A partir dessa etapa, os ruídos são usados no processo de geração de cenários de vazão/ENA sintética multivariados de acordo com a equação (2.1).

Maiores esclarecimentos sobre o processo de geração de cenários dos modelos GEVAZP e NEWAVE podem ser consultados em [1] [2].

2.1 Análise do ruído aleatório não correlacionado

A Figura 4 apresenta os resultados de média e desvio padrão obtidos após o processo de amostragem seletiva dos vetores de ruídos independentes para a amostra *backward* (20 cenários) para cada REE e em cada estágio do período de planejamento. Como a agregação é feita em uma amostra original, composta por vetores de ruídos normais i.i.d., busca-se manter na amostra agregada uma distribuição normal com média e desvio padrão aproximadamente igual a zero e um, respectivamente.

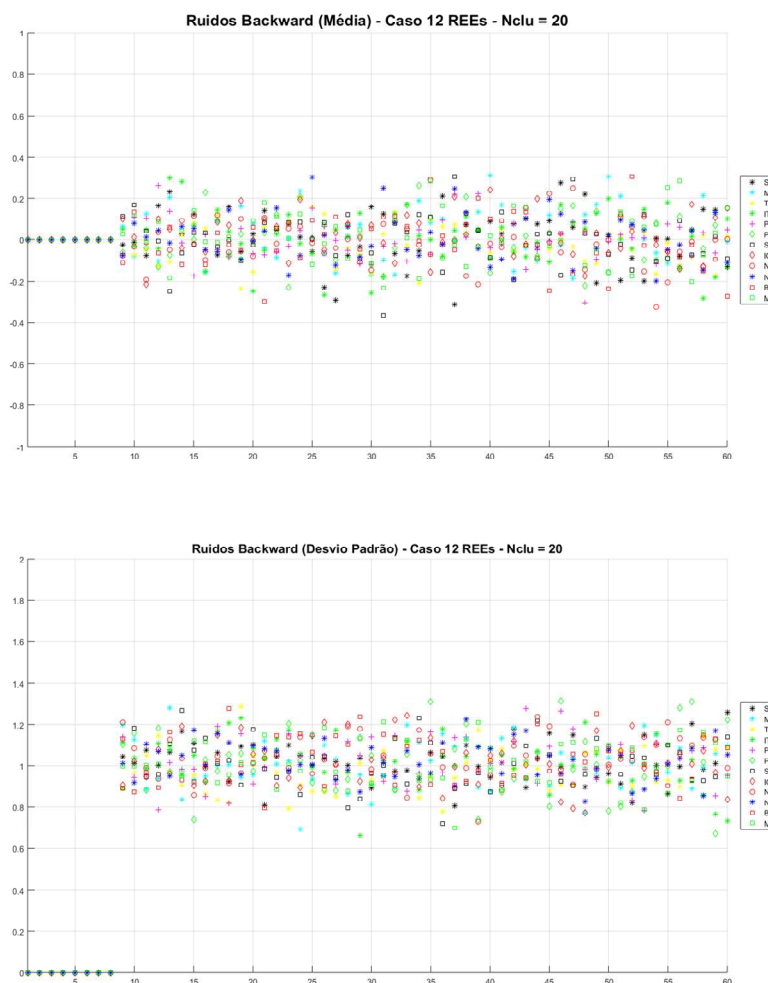


Figura 4 - Média e desvio padrão dos vetores de ruídos independentes da amostra *backward* para todos os 12 REEs

Sendo o REE Paraná um dos mais importantes devido à sua grande capacidade de armazenamento e geração de energia, e dado que ele possui uma alta correlação com o REE Sudeste, a Figura 5 apresenta o mesmo resultado da Figura 4, mas somente para esses dois REEs. Destaca-se, nessa análise, a média obtida no quinto vetor de ruídos independentes, que é utilizado para a geração de cenários do 5º estágio do PMO de setembro de 2017, ou seja,

Relatório Técnico – 10783/ 2018

cenários de janeiro de 2018 (décimo terceiro período). Pode-se observar que nesse período a média dos ruídos independentes amostrados para o REE Sudeste é um pouco maior que 0,22 e para o REE Paraná aproximadamente 0,16.

Com o intuito de se obter a probabilidade de ocorrência dessa combinação de ruídos nos REEs Sudeste e Paraná observado no quinto período, realizou-se o mesmo processo de amostragem seletiva, porém, para amostras originais geradas com outras sementes, obtendo-se assim um conjunto de mais de 1000 amostras a serem analisadas. A frequência de ocorrência de vetores de ruídos com média de ruídos do REE Sudeste $> 0,22$ e média de ruídos do REE Paraná $> 0,16$ foi de 0,27%.

Para efeito de comparação, realizou-se a geração de amostras de ruídos com as mesmas dimensões e a mesma quantidade de períodos, através da amostragem aleatória simples. Com essa técnica de amostragem e a mesma quantidade de amostras, a frequência de ocorrência desses vetores de ruídos foi de 5,6%.

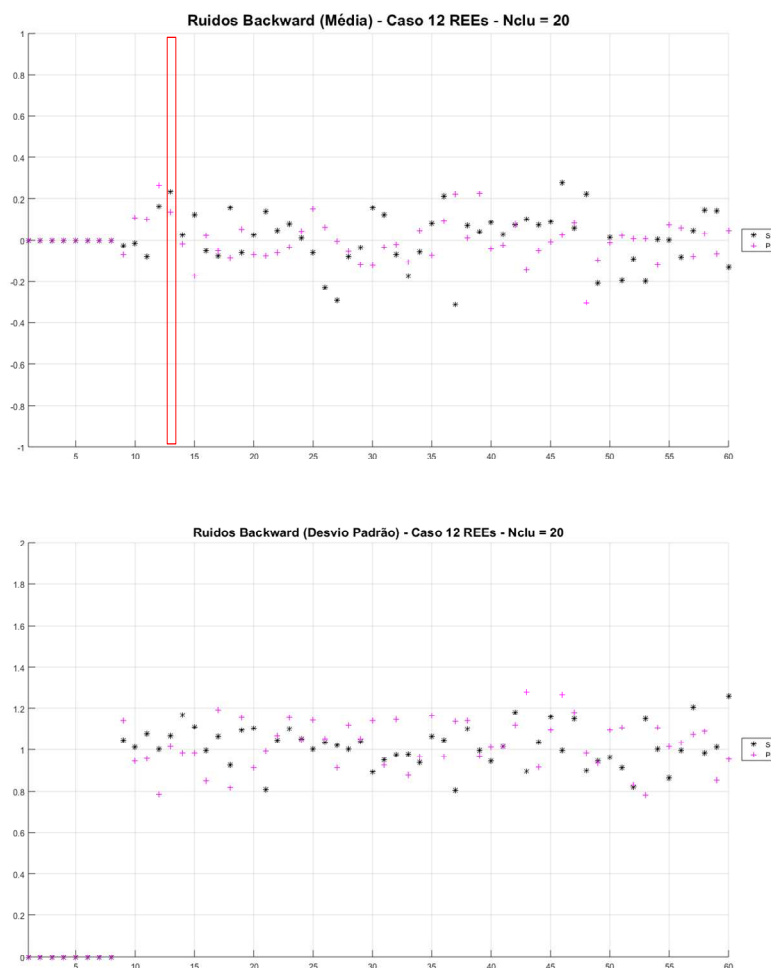


Figura 5 - Média e desvio padrão dos vetores de ruídos da amostra backward para REE Sudeste e Paraná

Desta forma, podemos afirmar que a geração de um conjunto de ruídos com as características observadas no 5º estágio é um evento pouco provável, porém ainda assim possível de ocorrer.

2.2 Análise do ruído aleatório correlacionado

Após o processo de amostragem seletiva, os ruídos passam por um processo de correlação espacial, garantindo-se assim que os cenários de ENA gerados levem em consideração correlação espacial entre os REEs, identificada no registro histórico. A Tabela 1 apresenta a correlação espacial anual entre os REEs. Observe que a correlação entre os REEs Sudeste e Paraná é grande, em torno de 0,66.

Tabela 1 – Correlação espacial anual histórica

	SUDESTE	MADEIRA	TPIRES	ITAIPU	PARANA	PRNPANEMA	SUL	IGUACU	NORDESTE	NORTE	BMONTE	MAN
SUDESTE	1	0.25	0.35	-0.09	0.66	-0.02	-0.19	-0.08	0.89	0.78	0.28	-0.24
MADEIRA	0.25	1	0.37	0.17	0.17	0.12	0.08	0.04	0.17	0.31	0.18	-0.21
TPIRES	0.35	0.37	1	-0.12	0.2	-0.19	-0.26	-0.23	0.21	0.43	0.45	0.02
ITAIPU	-0.09	0.17	-0.12	1	0.31	0.82	0.69	0.77	-0.19	-0.01	-0.17	-0.09
PARANA	0.66	0.17	0.2	0.31	1	0.44	0.19	0.27	0.6	0.39	0.11	-0.31
PRNPANEMA	-0.02	0.12	-0.19	0.82	0.44	1	0.7	0.83	-0.11	-0.05	-0.17	-0.22
SUL	-0.19	0.08	-0.26	0.69	0.19	0.7	1	0.86	-0.21	-0.19	-0.25	-0.19
IGUACU	-0.08	0.04	-0.23	0.77	0.27	0.83	0.86	1	-0.12	-0.11	-0.24	-0.14
NORDESTE	0.89	0.17	0.21	-0.19	0.6	-0.11	-0.21	-0.12	1	0.64	0.19	-0.24
NORTE	0.78	0.31	0.43	-0.01	0.39	-0.05	-0.19	-0.11	0.64	1	0.5	-0.06
BMONTE	0.28	0.18	0.45	-0.17	0.11	-0.17	-0.25	-0.24	0.19	0.5	1	0.33
MAN	-0.24	-0.21	0.02	-0.09	-0.31	-0.22	-0.19	-0.14	-0.24	-0.06	0.33	1

A imposição da correlação espacial é feita através de uma decomposição na matriz de correlação espacial anual histórica, que resulta em uma matriz triangular inferior, que transforma os ruídos não-correlacionados em correlacionados. Sendo utilizada uma matriz triangular inferior, o primeiro índice dessa matriz possui impacto em todas as outras dimensões, o segundo índice impacta apenas a partir da terceira dimensão, e assim por diante. Em termos práticos, os ruídos aleatórios do REE Sudeste não se alteram e impactam a todos outros REEs, com magnitude menor ou maior, dependendo da correlação espacial histórica entre os REEs.

Mantendo o foco nos resultados de média e desvio padrão apenas para os REEs Sudeste e Paraná, apresenta-se na Figura 6 a média e desvio padrão obtido para seus ruídos correlacionados. Destaca-se que a média dos ruídos não correlacionados do REE Paraná passa de 0,16 para 0,37 na amostra correlacionada. Isto ocorre, pois os ruídos aleatórios do REE Sudeste, que possuem média 0,22, tem grande impacto nos ruídos do REE Paraná, dado que estes dois REEs estão fortemente correlacionados.

Em seguida, os vetores de ruídos correlacionados são transformados em ruídos lognormais 3 parâmetros e finalmente aplicados em (2.1) para obtenção dos cenários de afluência

multivariados. É de se esperar que conjuntos de ruídos com média muito elevada gerem cenários de afluência com médias mais altas que o valor esperado condicionado (VEC).

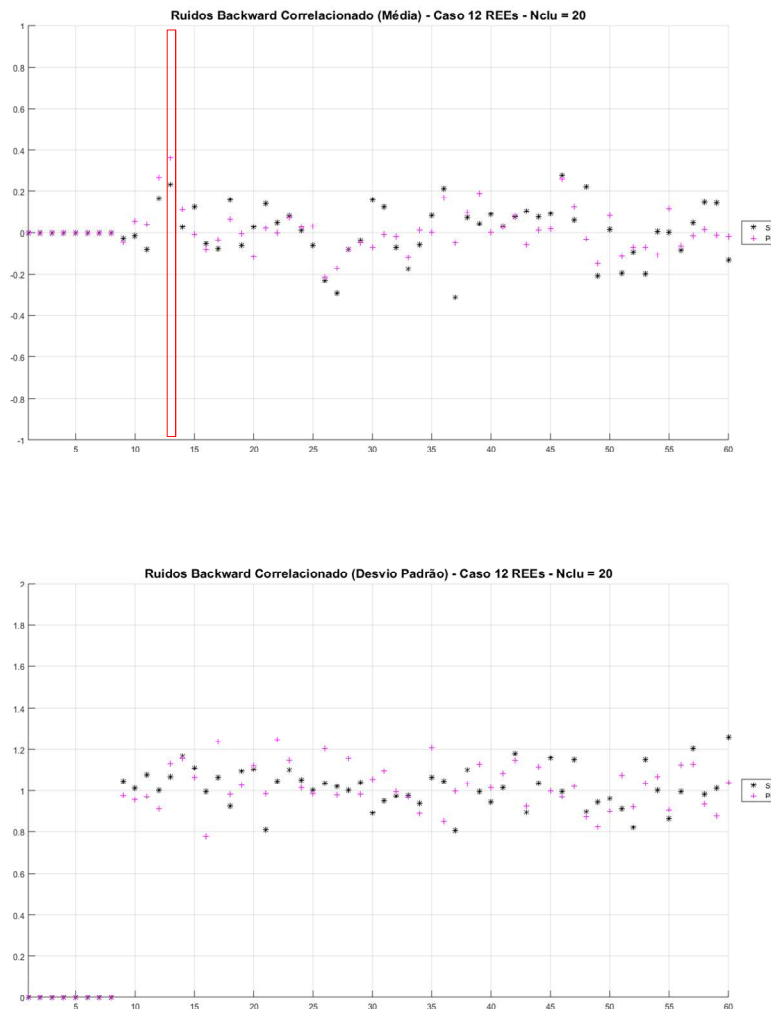


Figura 6 – Média e desvio padrão obtido para os ruídos correlacionados dos REEs Sudeste e Paraná

2.3 Análise da ENA *backward*

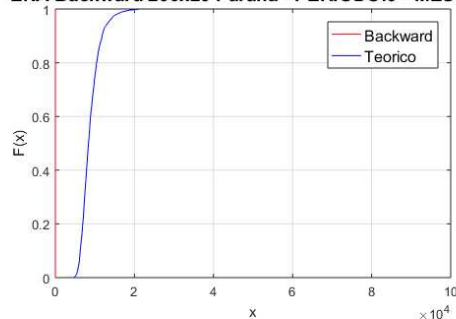
Nesta seção apresentam-se a seguir a distribuição de frequência acumulada da geração de cenários para ENA *backward* em todos os estados do REE Paraná nos primeiros estágios do PMO de setembro de 2017¹. Os gráficos apresentados na Figura 7 trazem uma comparação com a distribuição obtida nos mesmos períodos na etapa da simulação final, que podemos considerar como uma aproximação da distribuição teórica (distribuição condicionada). Pode-se observar que no décimo terceiro período (5º estágio - jan/18) ocorre a maior diferença verificada nas

¹ Os cortes de Benders são calculados para o 2º estágio em diante, por este motivo não foram apresentados os valores de ENA para o 1º estágio (set/17) nas Figuras 7 e 10.

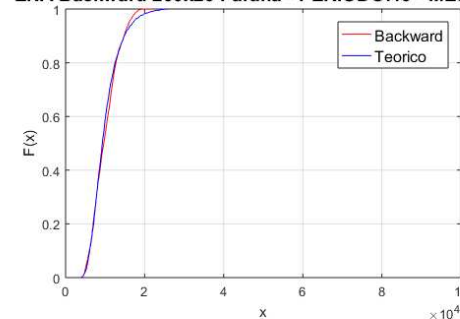
Relatório Técnico – 10783/ 2018

distribuições, demonstrada por um descolamento entre as duas curvas. A distribuição obtida pela amostra *backward* possui cenários de ENA, em sua maioria, maiores que na simulação final, possuindo assim uma média maior. A explicação para essa diferença reside principalmente no vetor de ruídos da amostra *backward* obtido após o processo de agregação. Conforme apresentado anteriormente, a média dos ruídos para o REE Paraná nesse período após o processo de amostragem seletiva e correlação espacial, é de 0,37, enquanto que na simulação final, as amostras por serem obtidas através de uma grande quantidade de ruídos sorteados com a amostragem aleatória simples com 2000 ruídos, possuem aproximadamente média zero.

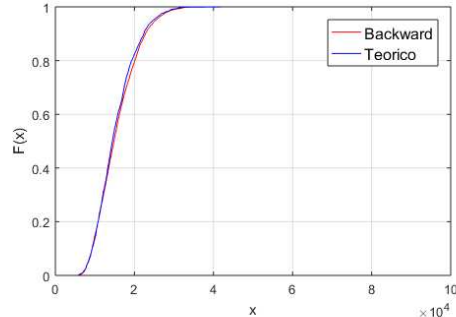
ENA Backward 200x20 Paraná - PERIODO:9 - MES: Set



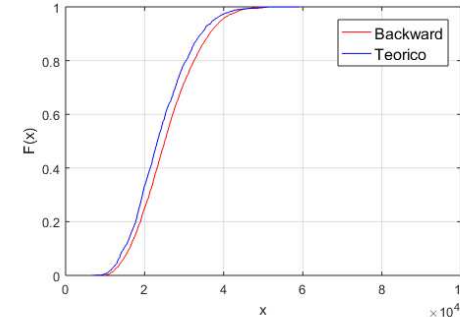
ENA Backward 200x20 Paraná - PERIODO:10 - MES: Out



ENA Backward 200x20 Paraná - PERIODO:11 - MES: Nov



ENA Backward 200x20 Paraná - PERIODO:12 - MES: Dez



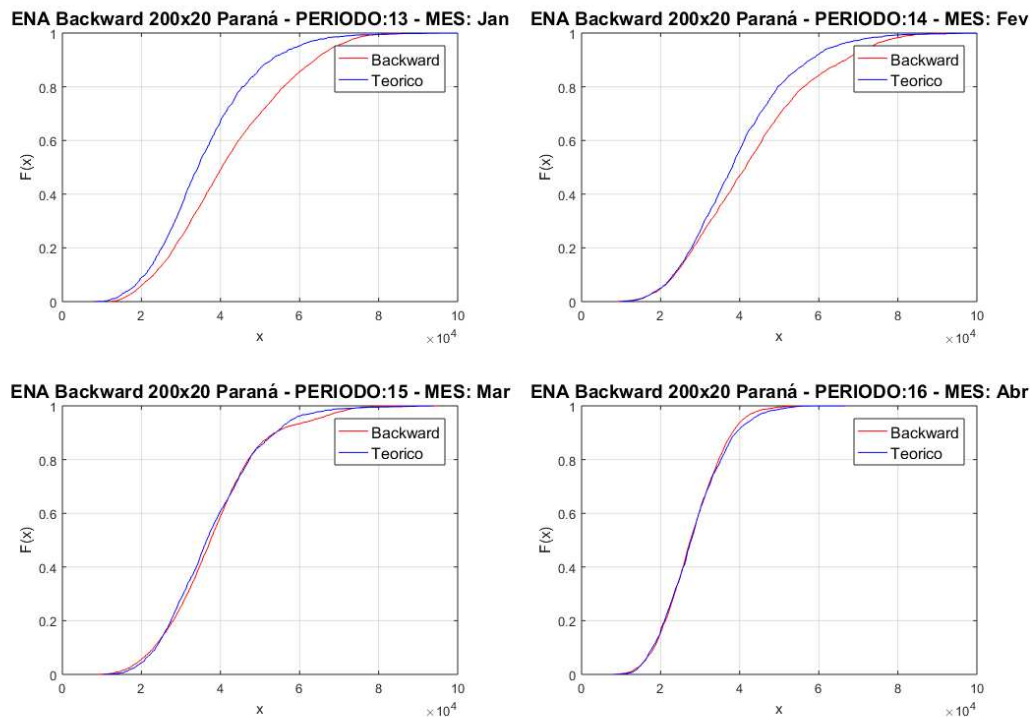


Figura 7 - Comparação entre distribuições amostrais e teóricas da ENA no passo backward para os períodos 9 a 16 com o vetor de ruídos original

A seguir na Figura 8 apresenta-se a evolução do CMO para esse PMO. Observa-se que entre o 4º e 5º estágios (dez/17 e jan/18) há uma quebra do comportamento da evolução, representado por uma alteração brusca na derivada da evolução do CMO. Esta mudança de comportamento ocorre devido à percepção futura de um montante maior de ENA nos cenários *backward*, para os quais são construídos os cortes de Benders.

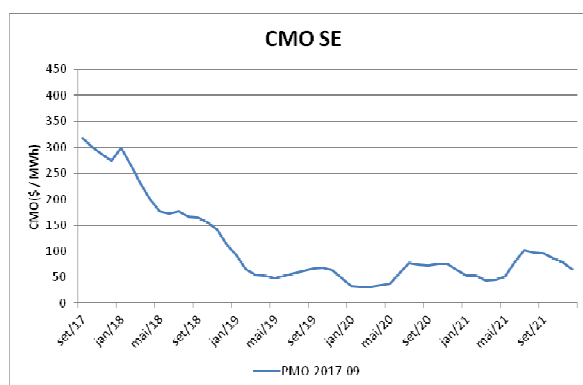


Figura 8 – Evolução do CMO para o submercado Sudeste no PMO de setembro de 2017

Para efeito de comparação, produziu-se na Figura 9 uma evolução fictícia do CMO caso o mesmo mantivesse a derivada na passagem do 4º estágio para 5º estágio encontrada nos períodos

adjacentes. É possível observar que há uma diferença de cerca de 50 R\$/MWh quando comparado com o CMO observado na simulação oficial.

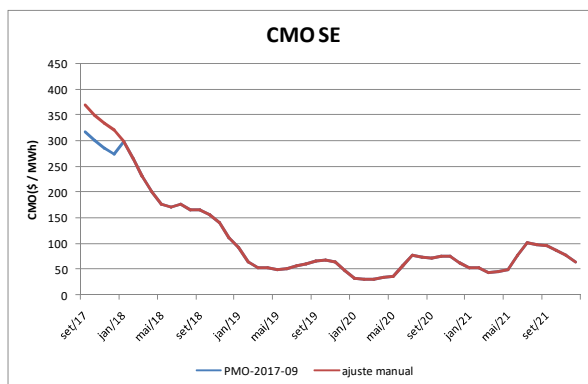


Figura 9 – Comparação da evolução do CMO para o submercado Sudeste no PMO de setembro de 2017 com a evolução fictícia

Como se identificou que o 5º estágio (jan/18) apresenta uma distribuição dos valores de ENA *backward* superior no REE Paraná, na próxima seção será feita uma análise de sensibilidade pontual nesse período, trocando-se o conjunto de vetores de ruídos aleatórios da amostra *backward*. Vale ressaltar que a amostra de ruídos *forward* não foi alterada.

2.4 Análise da ENA *backward* com resorteio de ruídos aleatórios

Dado que o vetor de ruídos aleatórios *backward* amostrado para esse período tem uma média elevada, e uma probabilidade de ocorrência muito pequena, será feita a troca desse vetor. A Figura 10 apresenta os resultados da distribuição de probabilidade acumulada da ENA *backward* obtida no mesmo PMO, porém, substituindo-se o vetor de ruídos *backward* apenas do 5º estágio (jan/18), onde ocorreu o descolamento das duas distribuições. Observa-se que todas as outras distribuições acumuladas de probabilidade permaneceram idênticas às apresentadas anteriormente, sendo modificado apenas a do 5º estágio, que passou a ter uma distribuição parecida com a teórica. Dessa forma, pode-se concluir que, de fato, a amostra de ruídos aleatórios *backward* nesse período é a responsável pela ocorrência da queda observada no valor do CMO médio anual.

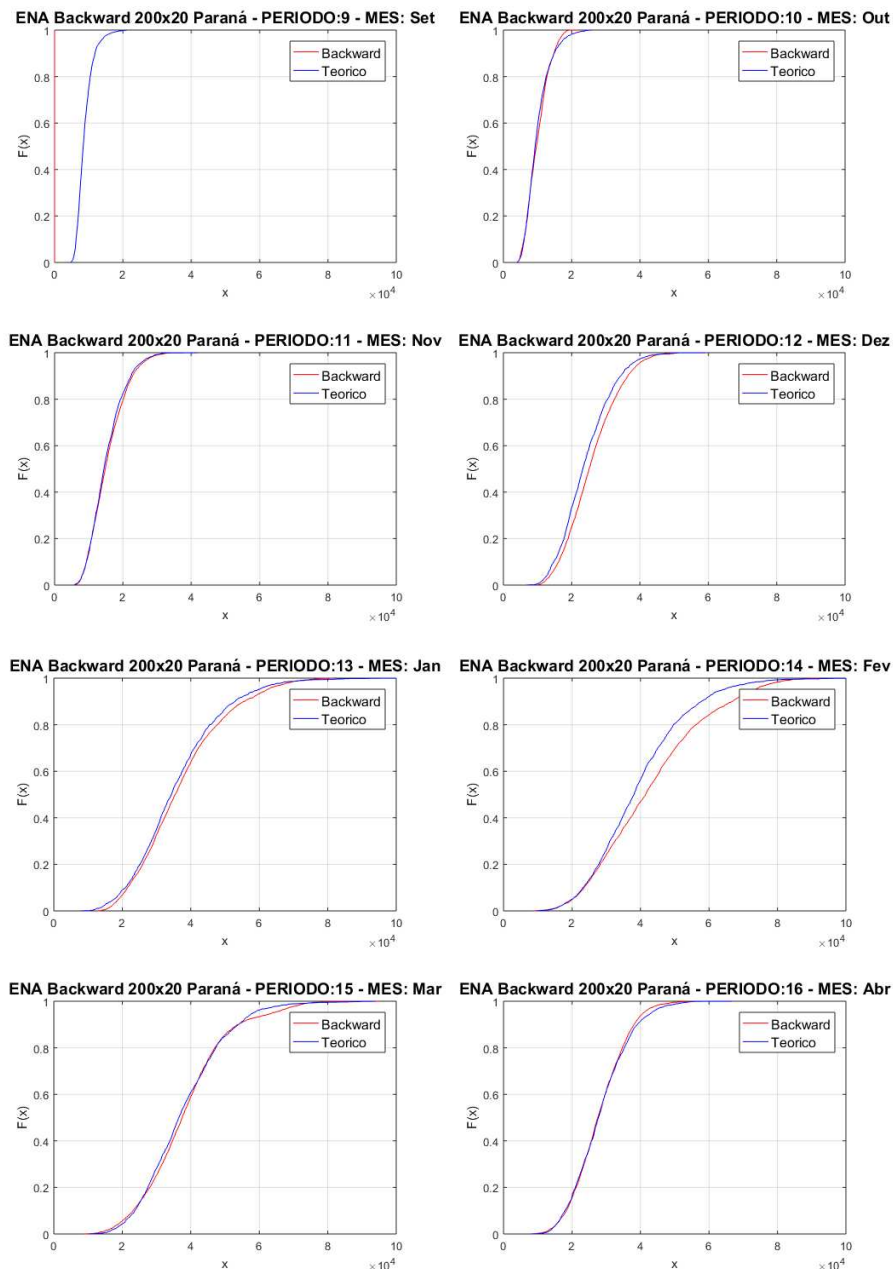


Figura 10 – Comparação entre as distribuições amostral e teórica da ENA no passo backward para os períodos 9 a 16 depois de trocar o vetor de ruídos do período 13 (5º estágio)

Após a análise dos cenários sintéticos de ENA, apresenta-se na Figura 11 a evolução do CMO para o submercado Sudeste. Como pode ser observado, o CMO manteve o comportamento típico esperado, sem a queda brusca encontrada no 5º estágio do PMO original. Como a única modificação do PMO original para esse caso é o vetor de ruídos aleatórios *backward* amostrado no 5º estágio, demonstra-se que a queda na evolução do CMO, de fato, é causada por esse conjunto de ruídos com média elevada.

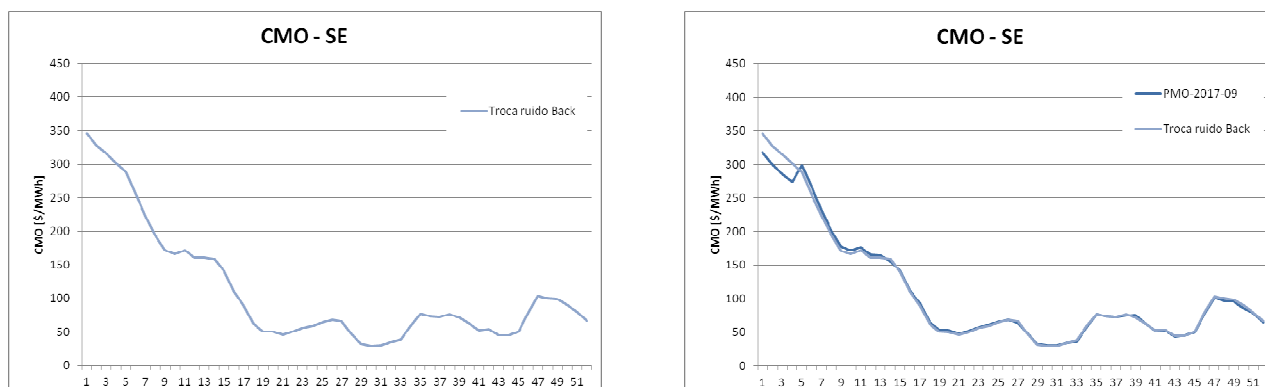


Figura 11 – Comparação Evolução do CMO para o submercado Sudeste com o resorteio de ruídos no passo backward (5º estágio) e original

A Tabela 2 abaixo compara os resultados finais da operação obtidos no caso original e caso em que se trocou o vetor de ruídos *backward* no 5º estágio.

Tabela 2 – Comparação entre os resultados finais da operação obtidos no caso original e no caso com o resorteio de ruídos backward no 5º estágio.

	Original	Resorteio	Dif (%)
COPER	24124.41	24575.16	1.87%
GERACAO TERMICA	21548.12	21774.12	1.05%
DEFICIT	1115.27	1081	-3.07%
VERTIMENTO	0.71	0.7	-1.41%
EXCESSO ENERGIA	0	0	-
VIOLACAO CAR	0	0	-
VIOLACAO SAR	0	0	-
VIOL. OUTROS USOS	356.82	371.64	4.15%
VIOLACAO EVMIN	591.62	641.75	8.47%
VIOLACAO VZMIN	0	0	-
INTERCAMBIO	1.23	1.22	-0.81%
VIOL. INTERC. MIN.	0	0	-
VERT. FIO N. TURB.	1.14	1.13	-0.88%
VIOLACAO GHMIN	509.52	703.6	38.09%
VIOLACAO GHMINU	0	0	-
VIOLACAO RETIRADA	0	0	-

Outra análise de sensibilidade realizada foi trocar os ruídos aleatórios independentes gerados para os REEs Sudeste e Paraná no 5º estágio com outros REEs neste mesmo estágio. Desta forma, o conjunto de ruídos independentes do 5º estágio (passo *backward*) não sofreu alteração, porém o conjunto de ruídos com média elevada ficou associado a um REE com uma participação menor no montante de energia natural afluente no subsistema Sudeste. O resultado obtido para a

evolução do CMO médio para o submercado Sudeste nesta sensibilidade está ilustrado na Figura 12. Assim, como observado na sensibilidade anterior, o CMO médio deixou de apresentar a inflexão entre os 4º e 5º estágios.

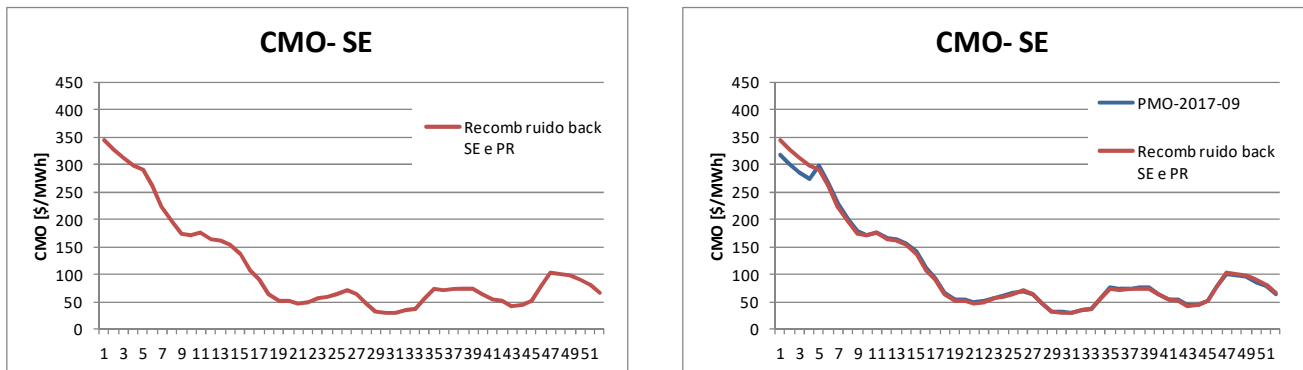


Figura 12 – Comparação Evolução do CMO para o submercado Sudeste com a recombinação de ruídos no passo backward (5º estágio) e original

Adicionalmente, uma análise complementar foi realizada modificando completamente a amostra de ruídos *backward*. Foram consideradas 10 amostras além da amostra tradicionalmente considerada, destacada em negrito na Figura 13. É possível verificar que para grande maioria das amostras não é observado o comportamento de redução do CMO.

A variabilidade dos resultados de CMO observada nos primeiros períodos não foi objeto de análise deste relatório, porém vale ressaltar que esta variabilidade é reduzida ao se adotar a reamostragem de cenários. Estes resultados podem ser consultados no Relatório Técnico 6606/2018 "Técnicas de Reamostragem de Cenários Hidrológicos para a simulação forward da PDDE na Definição da Estratégia de Operação Energética de Longo/Médio Prazo" [14].

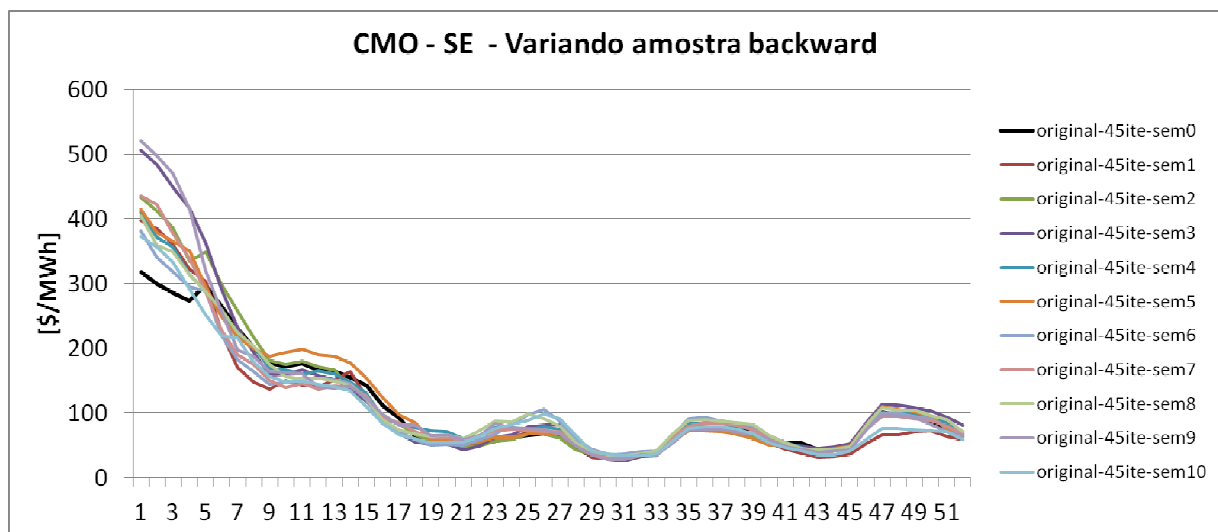


Figura 13 – Evolução do CMO com diferentes amostras para passo backward

3 Análise do Valor da Água

O custo marginal de operação resulta da solução do problema de despacho de operação associado a um estado e a uma abertura do passo *backward* (afluência durante o estágio em questão). Durante a resolução deste problema no estágio (t), a FCF, construída no estágio ($t+1$), é acessada com a afluência considerada na abertura *backward* do estágio (t) e com as afluições passadas de ($t-1$) até ($t-p+1$) do cenário *forward* considerado. Dessa forma, o cálculo do CMO em um estágio qualquer depende da amostra de ruídos aleatórios sorteados no passo *backward* um estágio à frente. É clara, portanto, a dependência entre o cálculo do CMO e as aberturas do passo *backward* na construção da FCF. Nesta análise o valor da água será utilizado para representar o coeficiente da FCF acessada pelos 2000 estados visitados na simulação final.

Na Figura 14(a) e (b) é apresentada a distribuição de frequências acumulada do valor da água para o REE Paraná para os 2000 cenários da simulação final para os estágios 4 e 5, respectivamente, para o caso original e para o caso onde o conjunto de ruídos aleatórios do 5º estágio da *backward* foi trocado (para todos os REEs). É possível perceber que há uma diferença mais elevada nos valores da água do 4º estágio, que foi obtido consultando a FCF construída no 5º estágio.

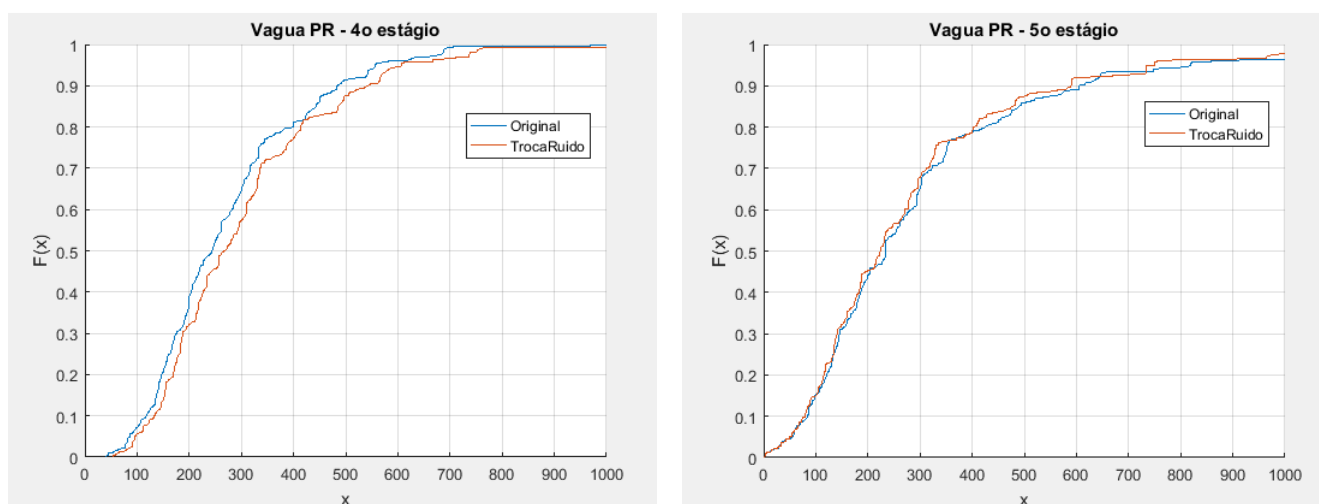


Figura 14 – Distribuição de frequências acumulada do valor da água do REE Paraná para o caso original e com o ruído do 5º estágio trocado (a) 4º estágio (b) 5º estágio

Como visto anteriormente, o montante de energia natural afluente no 5º estágio está maior do que o esperado, o que faz com que a FCF construída neste estágio apresente valores mais baixos quando se considera o conjunto de ruídos aleatórios com média mais próxima de zero. Este comportamento pode ser verificado na Figura 15, onde é apresentada a distribuição de frequências acumulada dos coeficientes da FCF associados à energia armazenada do REE Paraná, dos cortes construídos no 5º estágio e acessados no 4º estágio. O comportamento é bastante semelhante ao observado na Figura 14(a), conforme esperado.

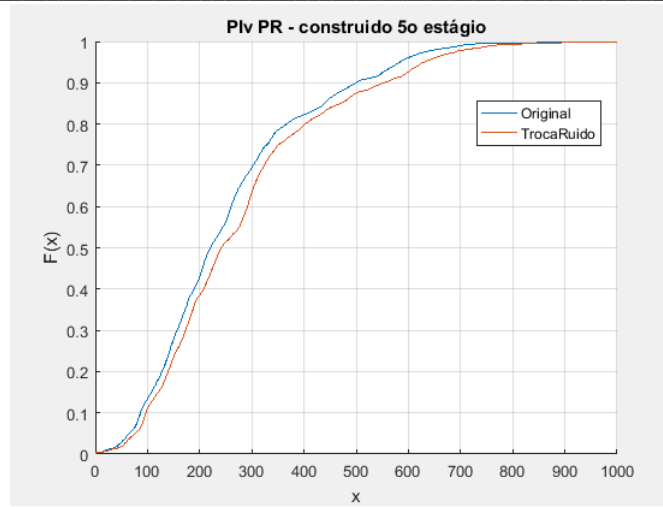


Figura 15 – Distribuição acumulada do Piv do REE Paraná construído no 5º estágio

4 CONCLUSÕES

As análises feitas neste relatório mostraram que a queda no CMO em dezembro de 2018 ocorreu porque a FCF acessada para aquele mês foi construída a partir de cenários de ENA com valores atipicamente superiores, gerados pelo sorteio de ruídos aleatórios com média mais elevada em janeiro de 2018.

Uma investigação mais detalhada mostrou que a amostra de ruídos aleatórios independentes para as 20 aberturas de ENA no passo *backward* do algoritmo de PDDE em janeiro de 2018 possuía média de 0,22 para o REE Sudeste e média igual a 0,16 para o REE Paraná. Ao se incorporar a correlação espacial entre esse dois REEs, a média dos ruídos aleatórios do REE Paraná aumentou para 0,37, o que indica um conjunto de cenários hidrológicos bastante favorável. Esse aspecto, por sua vez, levou a formação de um corte de Benders baixo para este mesmo período. Consequentemente, construiu-se uma FCF que favorecia a um maior despacho hídrico, reduzindo assim o CMO, no quarto estágio.

Após a constatação das médias mais elevadas das amostras de ruídos aleatórios empregadas para a construção da FCF, analisou-se o mesmo caso com apenas uma modificação: um resorteio da amostra de ruídos no passo *backward* em janeiro de 2018. Esse procedimento garantiu que apenas a influência daquela amostra sobre o cálculo do CMO fosse investigada. O resultado obtido nesta sensibilidade demonstrou que caso uma nova amostra de ruídos fosse escolhida, não haveria a descontinuidade observada para janeiro de 2018. O mesmo resultado foi obtido em uma segunda análise de sensibilidade, onde os ruídos aleatórios independentes gerados para os REEs Sudeste e Paraná no 5º estágio foram trocados com outros REEs neste mesmo estágio.

Além disso, a probabilidade de um sorteio de vetores de ruídos aleatórios do REE Sudeste e do REE Paraná com média maiores que 0,22 e 0,16 respectivamente foi de 0,27%, mostrando que sorteios como o que levou à inflexão observada na evolução do CMO médio são atípicos, mas possíveis de ocorrerem.

O aprimoramento das metodologias utilizadas nos modelos aplicados ao planejamento da operação energética deve ser uma atividade constante. O processo de geração de cenários de aflúncias pode ser melhorado de forma a minimizar ainda mais a ocorrência de cenários tão atípicos como aqueles observados para a amostra *backward* no 5º período. Dado esse objetivo, o CEPEL tem avaliado algumas possíveis melhorias no algoritmo de agregação da amostragem seletiva, além de procurar identificar outras técnicas de amostragem que também representem de forma adequada o processo hidrológico com um número reduzido de cenários.

5 REFERÊNCIAS

- [1] 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, pp. 305-310, Vancouver, Canada, Set. 1997.
- [2] D.D.J. Penna, M.E.P. Maceira, J.M.Damázio, F. Treistman, H.S. Araújo, Manual de Referência do modelo GEVAZP, Relatório Técnico CEPEL – nº 27155/2017, 2017.
- [3] M.E.P. Maceira, L.A. Terry, F.S. Costa, J.M. Damazio, A.C.G. Melo, "Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System", 14th PSCC – Power Systems Computation conference, Sevilla, Spain, 2002.
- [4] M.E.P. Maceira and J.M.Damázio, "Use Of The Par(p) Model In The Stochastic Dual Dynamic Programming Optimization Scheme Used In The Operation Planning Of The Brazilian Hydropower System". Probab. Eng. Inf. Sci. 20, vol1, pp 143-156, January 2006.
- [5] A.L. Diniz, T.N. Santos, L.C. Santos, R.N. Cabral, Notas Técnicas do modelo DECOMP, Relatório Técnico CEPEL – nº 30982/2016, Dez/2017.
- [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", 16º PSCC – Power Systems Computation conference, Glasgow, 2008.
- [7] M.E.P. Maceira, et al., "Twenty years of application of stochastic dual dynamic programming in official and agent studies in Brazil – main features and improvements on the NEWAVE model", 20º Power Systems Computation Conference, Dublin, Ireland, 2018.
- [8] M.V.F. Pereira, L.M.V.G. Pinto, "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning", Mathematical Programming, 1-3, vol. 52, 1991
- [9] D.D.J. Penna, M.E.P. Maceira, J.M. Damazio, "Selective Sampling Applied to Long-term Hydrothermal Generation Planning", 17º PSCC - Power Systems Computation Conference, Stockholm, Sweden, 2011.
- [10] K.W. Hipel, A.I. McLeod. "Time series modelling of water resources and environmental systems". Vol. 45. Elsevier, 1994.
- [11] M.E.P. Maceira, "Programação Dinâmica Dual Estocástica Aplicada ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos com Representação do Processo Estocástico de Afluências por Modelos Auto-Regressivos Periódicos", Relatório Técnico Cepel, Junho 1993.
- [12] G.E.P.Box, D.R.Cox, "An Analysis of Transformations", Journal of The Royal Statistical Society, A127, pp. 211-252, 1964.
- [13] D.D.J. Penna, M.E.P. Maceira, J.M.Damázio, A.L.Diniz, A.C.G. Melo, F. Treistman , , CEPEL, Relatório Técnico 27538/2017, "Análise do comportamento do custo marginal de operação do modelo newave ao se passar de 9 para 12 reservatórios equivalentes de energia.", Dez/2017.
- [14] M.E.P. Maceira, D.D.J. Penna, C.B. Cruz, A.L. Diniz, A.C.G. Melo, F. Treistman, "Técnicas de Reamostragem de Cenários Hidrológicos para a Simulação *forward* da PDDE na Definição da

Relatório Técnico – 10783/ 2018

Estratégia de Operação Energética de Longo/Médio Prazo”, Relatório Técnico 6606/2018, Jun/2018.

[15] Charbeneau, "Comparison of the two and three parameter lognormal distributions used in streamflow synthesis", Water Resources Research, Vol. 14, No. 1, pp. 149-150, 1978.

[16] L. Terry, M. Pereira, T. A. Neto, L. Silva, and P. Sales, "Coordinating the energy generation of the brazilian national hydrothermal electrical generating system," Interfaces, vol. 16, pp. 16-38, Feb 1986.

[17] Ennes, M.I.A., Penna, D.D.J., Maceira, M.E.P., Diniz, A.L, Vasconcellos, C.L., "Representação de subsistemas e submercados de forma diferenciada no planejamento da operação hidrotérmica." In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013, Brasília. XXII SNPTEE, 2013.