

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL



Relatório Técnico

Nº/Ano: 27538/2017	Nº de Páginas: 53	Nº de Anexos:
---------------------------	--------------------------	----------------------

Título: Análise do comportamento do custo marginal de operação do modelo NEWAVE ao se passar da representação de 9 para 12 reservatórios equivalentes de energia.

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 analisa a variação dos custos marginais de operação calculados pelo modelo NEWAVE, verificada nos PMOs de Setembro e Outubro de 2017, quando se passa de uma representação do parque hidroelétrico de 9 para 12 reservatórios equivalentes de energia (REEs). Foram identificadas como causas: (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 aflúncias no algoritmo da programação dinâmica dual estocástica. Foram também apontadas alternativas para a redução da variação amostral na dispersão das amostras dos ruídos, tais como ajustes nos parâmetros do modelo (aumento do número de cenários da recursão backward e da simulação forward) e, aprimoramentos na modelagem, tais como, emprego de técnicas de reamostragem e combinação do uso de series condicionadas com não condicionadas, e níveis de armazenamento em que se queira proteger.

Autores:

Débora D. Jardim Penna - Cepel
Maria Elvira Piñeiro Maceira - Cepel
André L. Diniz Souto Lima - Cepel
Albert C. Geber de Melo - Cepel
Felipe Treistman - PUC/RJ

Palavras-Chave:

Custo Marginal de Operação, Programação Dinâmica Dual Estocástica, Modelo Auto Regressivo Periódico, Variação Amostral.

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 Bajóli Sotero
Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
28/12/2017

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL www.cepel.br
Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000 - Fax: 21 2260-1340
Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200 - Fax: 21 2667-3518
Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21944-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

PROJETO NEWAVE

Relatório Técnico

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CUSTO MARGINAL DE
OPERAÇÃO DO MODELO NEWAVE AO SE PASSAR DE 9 PARA 12
RESERVATÓRIOS EQUIVALENTES DE ENERGIA**

Dezembro/2017

ÍNDICE

1	Introdução	5
1.1	Contexto do estudo: aumento no número de REEs no modelo NEWAVE	6
1.2	Motivação: resultados com 9 e 12 REEs para o PMO de Setembro de 2017....	6
1.3	Constatações adicionais	7
1.4	Objetivo do estudo.....	8
2	Análise da implementação do modelo NEWAVE	10
2.1	Modelagem do acoplamento hidráulico quando há dois REEs à montante	10
2.2	Análise da geração de cenários para o conjunto Paraná-Paranapanema nas duas topologias.....	11
2.3	Rodadas determinísticas	15
2.4	Análise da inflexão ocorrida na evolução temporal do valor esperado dos CMOs.....	15
3	Levantamento das causas da redução do cmo	21
3.1	Complementaridade hidrológica entre os REEs Paraná e Paranapanema.....	21
3.2	Capacidade de armazenamento do REE Paranapanema (PP).....	23
4	Análise do impacto da variação amostral na redução do CMO.....	25
4.1	Análise da dispersão dos ruídos da recursão <i>backward</i>	26
4.1.1	Efeito do aumento no número de REEs.....	26
4.1.2	Efeito do aumento no número de cenários da recursão <i>backward</i>	29
4.2	Análise da dispersão dos ruídos da simulação <i>forward</i>	34
4.2.1	Efeito do aumento no número de REEs.....	34
4.2.2	Efeito do aumento no número de cenários da simulação <i>forward</i>	37
4.3	Análise da distribuição de frequências acumuladas das energias naturais afluentes.....	41
4.3.1	Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM na distribuição de frequências acumuladas das ENAS da recursão <i>backward</i>	41
4.3.2	Efeito do parâmetro NSIM na distribuição de frequências acumuladas das ENAS da simulação <i>forward</i>	43
4.4	Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM no valor esperado dos CMOs	44
4.4.1	Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM na inflexão ocorrida na evolução temporal do valor esperado dos CMOs	44
4.4.2	Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM no valor esperado dos CMOs	45
5	Conclusões	50
6	Referências.....	52

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de Thatiana Conceição Justino, Cristiane Barbosa da Cruz, Luiz Guilherme Marzano, Marcelo Frederico Zamboni, Camila Buzatto Rezino e Miryam Gerk Curty.

1 INTRODUÇÃO

O modelo NEWAVE 6-[3], desenvolvido pelo CEPEL, é um programa computacional utilizado para o planejamento da operação de longo/médio prazo e para o planejamento da expansão do setor elétrico. Este modelo é utilizado de forma oficial, sob supervisão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para coordenação da operação do sistema interligado nacional (SIN) e pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) para formação do preço *spot* da energia, também denominado preço de liquidação de diferenças (PLD). É utilizado também pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o planejamento da expansão do setor elétrico e para o cálculo da garantia física de energia, assim como para a obtenção de parâmetros utilizados no leilão de novas usinas. Adicionalmente, também é utilizado por empresas de energia elétrica e agentes em suas estratégias corporativas.

O objetivo do modelo NEWAVE é construir uma política operativa, com a qual é possível obter, entre outros resultados, metas mensais de geração hidroelétrica e termoelétrica para cada subsistema. Além disso, a função de custo futuro ao final do segundo mês é utilizada pelo modelo DECOMP, que determina, de forma mais detalhada, a geração de cada usina do sistema e os custos marginais de operação que formarão os preços de liquidação de diferença semanais, por patamar de carga.

A representação das aflúncias no modelo NEWAVE é estocástica, por meio de uma árvore de cenários, onde cada caminho na árvore é chamado de cenário hidrológico, e cada nó representa uma possível realização da aflúncia. Essas realizações seguem um processo estocástico multivariado, espacial e temporalmente, com propriedades estatísticas semelhantes ao registro histórico, as quais são preservadas durante a construção da árvore [4]. Para obter o valor final de energia afluenta a ser utilizada no problema de otimização, é utilizado um modelo autorregressivo periódico de ordem p , ou seja, o valor obtido para a variável aleatória em um determinado período é função das aflúncias dos p períodos anteriores [5].

Como é impossível percorrer a árvore de cenários por completo, utiliza-se a estratégia de Programação Dinâmica Dual Estocástica -PDDE, [6], [7] para resolver o problema, percorrendo-se um conjunto de séries de aflúncias em cada iteração, por meio de dois passos: (i) uma simulação *forward*, com os cenários hidrológicos amostrados, de forma a encontrar estados potencialmente relevantes para obtenção dos valores da água; (ii) uma recursão *backward*, onde se visitam todos os cenários de cada período, para cada realização da aflúncia, de forma a construir cortes de Benders para a função de custo futuro (FCF) ao final do período anterior. Devido à impossibilidade de se aplicar um critério estatístico de convergência proposto originalmente [6], em virtude da

implementação do mecanismo de aversão a risco CVaR (Valor Condicionado a um Dado Risco) [8]-[11], o processo para quando se verifica certa estabilidade no valor do limite inferior (ZINF), ou quando se atinge um número máximo de iterações pré-definido. A Figura 1.1 ilustra a estrutura de cenários *forward* e *backward* do modelo NEWAVE.

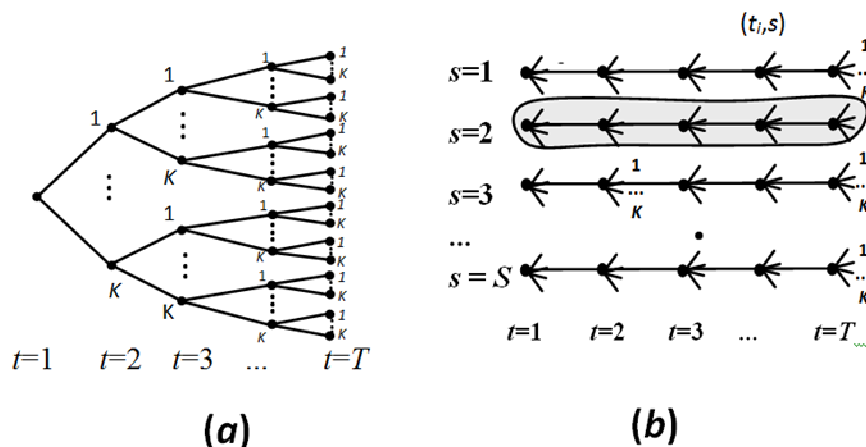


Figura 1.1 - Árvore de cenários completa de um problema multi-estágio (a) e estratégia de caminhamento na árvore pela PDDE (b), por meio de cenários *forward* e *backward*.

1.1 Contexto do estudo: aumento no número de REEs no modelo NEWAVE

Durante o ano de 2015 o Grupo de Trabalho “Questões Metodológicas Associadas aos Modelos Computacionais para a Expansão e Operação do Setor Elétrico Brasileiro” da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico - GT7/CPAMP, avaliou a representação do SIN com um número maior de REEs [12]. Naquela ocasião foram estudadas configurações considerando de 6 a 12 REEs, e indicou-se o uso de 12 REEs assim que aperfeiçoamentos para redução do tempo computacional fossem implementados no NEWAVE.

No primeiro semestre de 2017, o CEPEL incorporou, no modelo NEWAVE, a estratégia de seleção de cortes de Benders[13], que permitiu reduções razoáveis no tempo computacional de execução do modelo. Com isso, a CPAMP determinou, em junho de 2017, que passasse a ser adotada a configuração com 12 REEs a partir de Janeiro/2018 [14]. Na sequência, a FT-NEWAVE validou em Agosto de 2017 a versão 23.2.2 do modelo NEWAVE, que contém essa funcionalidade.

1.2 Motivação: resultados com 9 e 12 REEs para o PMO de Setembro de 2017

Após a conclusão dos trabalhos da FT-NEWAVE, agentes enviaram resultados pouco intuitivos de redução do custo de operação e do custo marginal de operação, ao passar de 9 para 12 REEs¹, para

¹ Ressalta-se que, embora de forma geral, espera-se um aumento do custo total de operação ao representar o SIN com um número maior de REEs, este comportamento não necessariamente deve ser observado.

estudos baseados no PMO de Setembro de 2017, como mostra a Figura 1.2. Tais reduções também foram observadas posteriormente, para os PMOs de Outubro e Novembro de 2017.

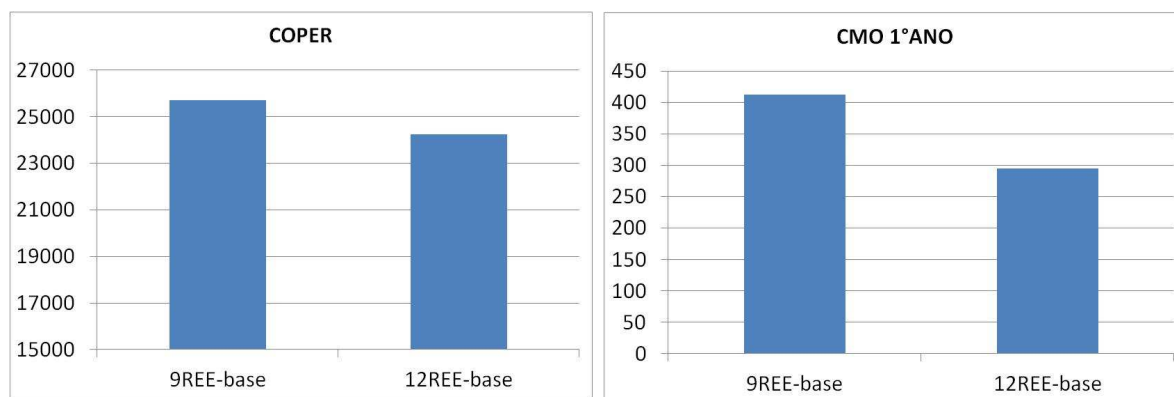


Figura 1.2 - Comparação entre o custo total esperado de operação (COPER) e o CMO médio do 1º ano nos cenários da simulação final, para o PMO de Setembro de 2017.

As configurações dos sistemas com 9 e 12 REEs são mostrados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Configurações de reservatórios equivalentes para os casos com 9 e 12 REEs.

9REEs	12 REEs
Sudeste	Sudeste
Madeira	Madeira
Teles Pires	Teles Pires
Itaipu	Itaipu
Paraná	Paraná
Sul	Parapanema
Nordeste	Sul
Norte	Iguaçu
Belo Monte	Nordeste
	Norte
	Belo Monte
	Manaus

1.3 Constatações adicionais

Ressalta-se que algumas constatações do grupo GT7/CPAMP, constantes do Relatório Final do estudo realizado em 2015 sobre o aumento do número de REE [12], já apontava para a possibilidade de redução dessas grandezas, conforme texto reproduzido a seguir:

"Por outro lado, a topologia C, que representa os REEs Itaipu e Paraná, bem como as topologias que contam com a representação do REE Parapanema, topologias D1 e G, apresentaram uma redução do CMO e do COPER, em relação às topologias A e B"

Topologia C: 6 REEs (separando-se Paraná e Itaipu)

Topologia G: 12 REEs , que está sendo estudada atualmente"

Uma explicação para esse fato também foi levantada no mesmo relatório:

"A redução observada no CMO e COPER pode ser atribuída a melhor representação da complementariedade hidrológica entre os REEs Itaipu, Paranapanema e a bacia do Paraná, combinada com um estado de armazenamento do sistema desfavorável"

Ressalta-se que, naquele relatório, análises mais completas e exaustivas da geração de cenários foram focadas no caso com 11 REEs.

Além do caso referente ao PMO de Setembro de 2017, o ONS realizou estudos comparativos entre as topologias 9 x 12 REEs desde o PMO de Janeiro de 2017, conforme mostrado na Figura 1.3.

Nesta figura, pode-se observar que:

- nos 9 casos analisados, 7 apresentam uma redução do CMO quando são considerados 12 REEs;
- nos 2 casos onde o CMO sofreu um acréscimo (PMOs de Junho e Julho de 2017), foi observado um aumento significativo na tendência hidrológica dos REEs Itaipu, Sul e Paraná;
- nos PMOs de Agosto e Setembro de 2017, a tendência hidrológica volta aos níveis anteriores e novamente o CMO decresce;

Cabe destacar, ainda, a necessidade de analisar esta variação entre os PMOs devido à mudança de tendência.

1.4 Objetivo do estudo

O caso descrito na seção anterior foi enviado ao CEPEL para análise. Portanto, este relatório tem por objetivo fazer uma análise comparativa do comportamento do modelo NEWAVE entre os casos com 9 e 12 REEs, com base nos dados dos PMOs de Setembro e Outubro de 2017, com foco na explicação do porquê da redução do custo marginal de operação (CMO) nestas configurações com maior número de REEs. Estes estudos visam subsidiar a CPAMP na possível reavaliação dos parâmetros número de aberturas backward e número de cenários *forward*, utilizados oficialmente no modelo NEWAVE, especialmente para o despacho e formação do PLD.

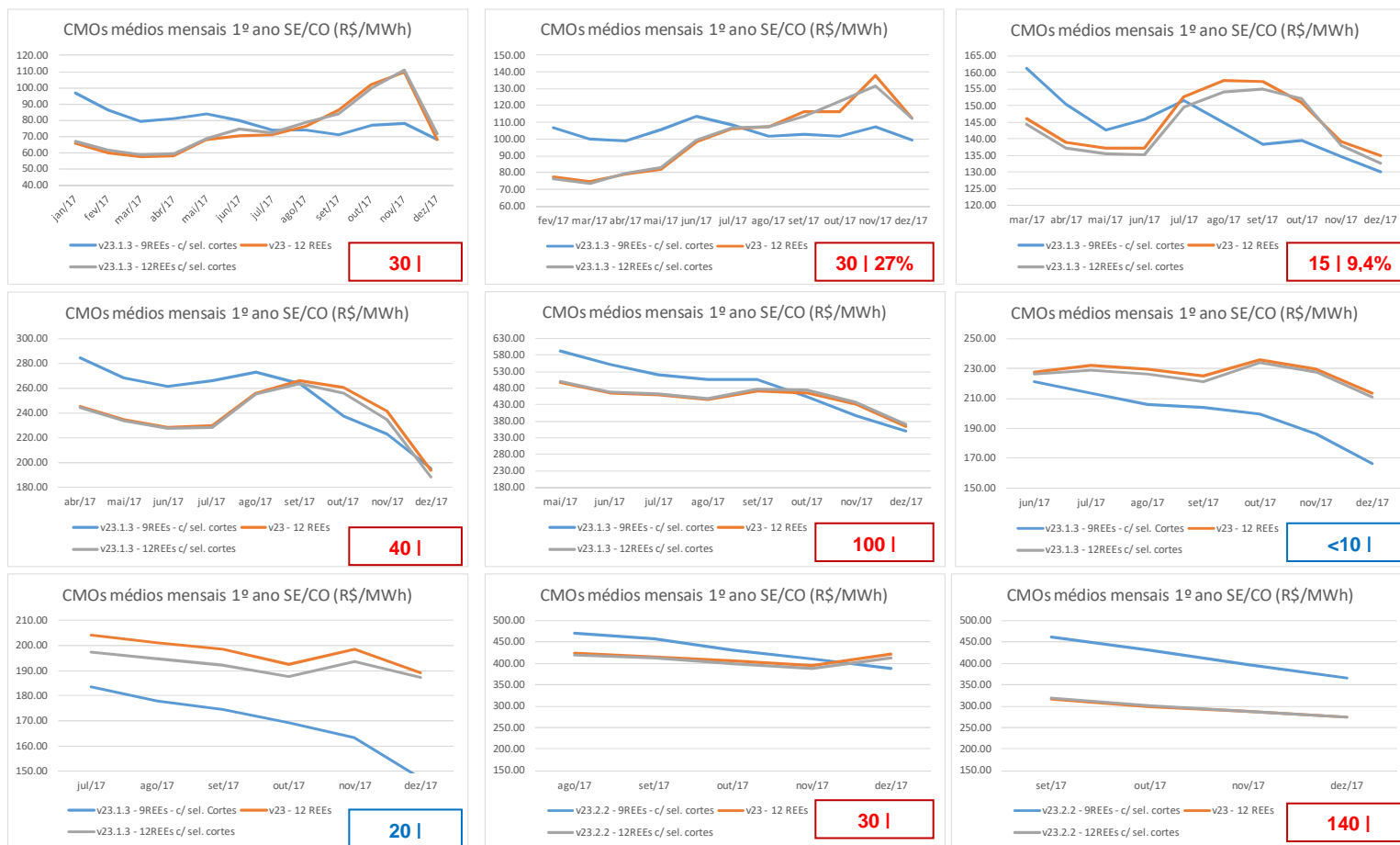


Figura 1.3 - Comparação entre o custo total esperado de operação (COPER) e o CMO médio do 1º ano nos cenários da simulação final, para o PMO de Setembro de 2017.

2 ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NEWAVE

2.1 Modelagem do acoplamento hidráulico quando há dois REEs à montante

Conforme ilustrado na Figura 2.1, no caso 12 REEs, ocorre uma condição topológica não verificada até o momento para o caso 9 REEs: a existência de dois REEs a montante de um outro REE, que é o caso dos REEs Paraná e Parapanema, ambos à montante do REE Itaipu. Desta forma, o CEPEL procedeu uma análise detalhada da implementação do acoplamento hidráulico no modelo NEWAVE, e chegou às seguintes conclusões:

- O cálculo das parcelas de acoplamento hidráulico está correto;
- A montagem do Problema de Programação Linear (PL) está correta: ambas as parcelas de acoplamento A e C dos REEs PR e PP estão sendo levadas em conta nas restrições do problema (atendimento à demanda, geração a fio d'água, perdas fio, etc);
- além disso, a consideração das parcelas de acoplamento constantes calculadas na altura equivalente está adequada, visto que não variação significativa das parcelas de acoplamento quando se aplica aparábola de correção, como mostra-se na Figura 2.2.

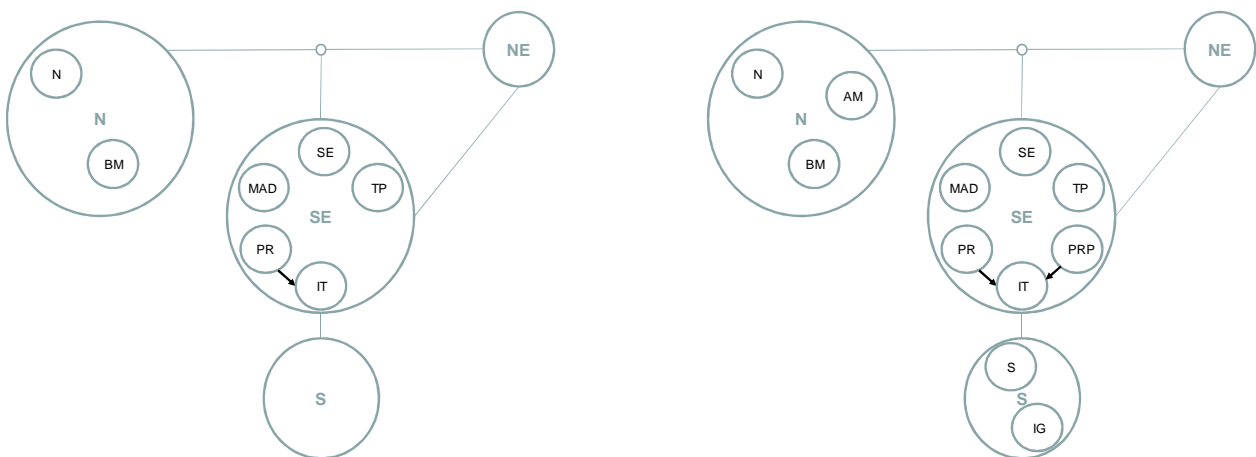


Figura 2.1 – Topologias do SIN com 9 e 12 REEs.

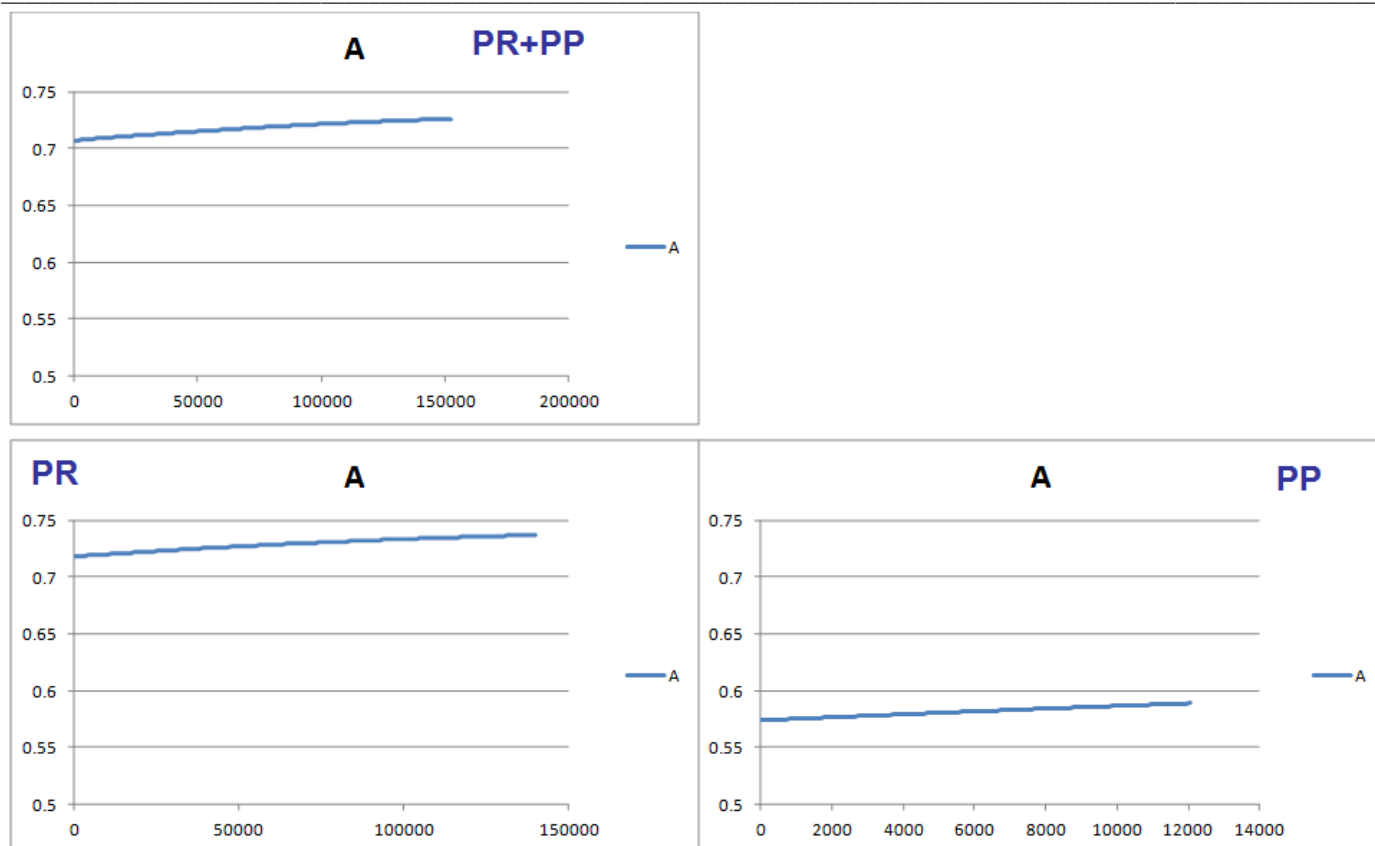


Figura 2.2 - Gráficos da parcela A de acoplamento, entre os REEs PR+P, para o caso 9REEs, e os REEs PR e PP, individualmente, para o caso 12 REEs.

2.2 Análise da geração de cenários para o conjunto Paraná-Paranapanema nas duas topologias

Nas Figura 2.3 à Figura 2.6 são apresentadas análises dos ruídos gerados para os passos *forward* e *backward* para o caso 12 REEs, a fim de verificar se o seu valor médio e desvio padrão, ao longo dos 120 períodos do estudo, estavam na faixa de variação aceitável pelo Teste t-Student (linha vermelha). Os resultados mostram a boa aderência das amostras aos testes realizados, em geral com acurácia superior a 90%. Nestas figuras o termo "sistema" refere-se a "REE"

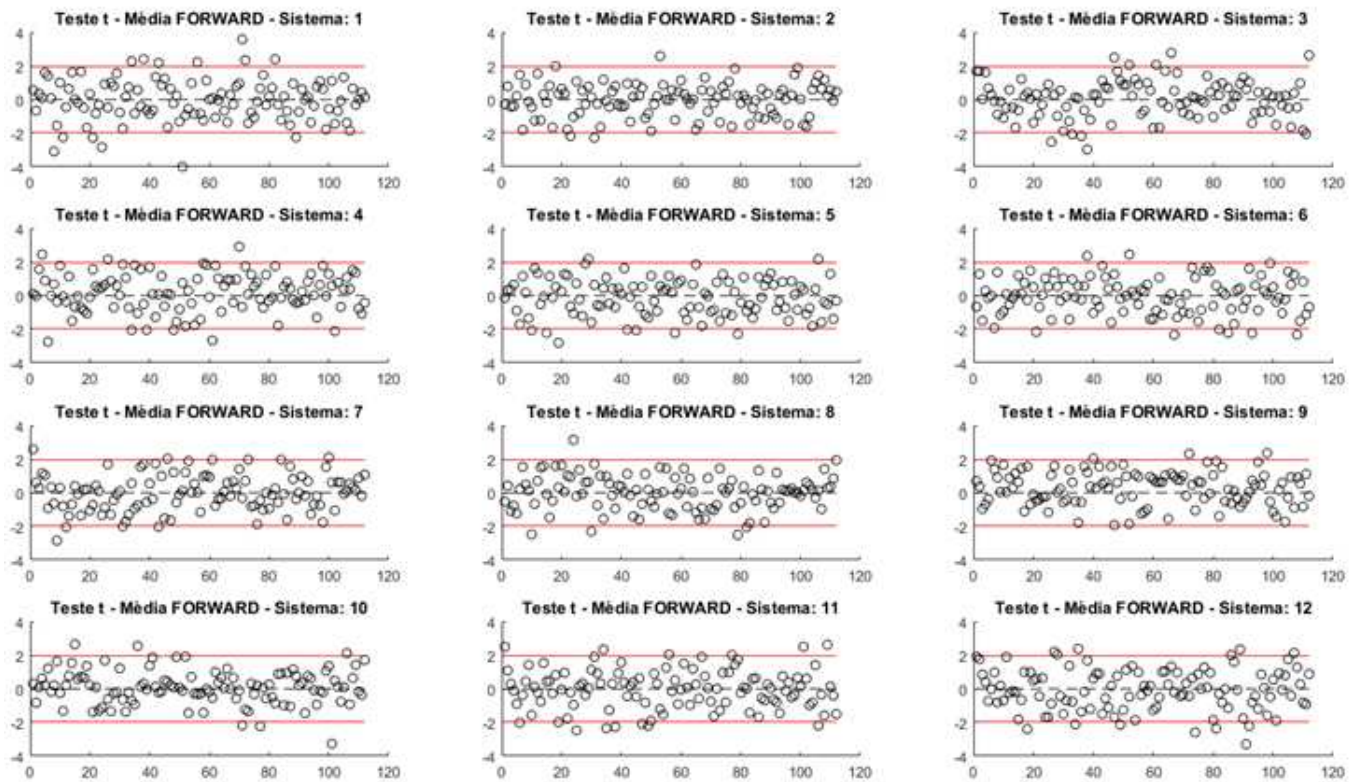


Figura 2.3 – Ilustração do teste t, para a média dos cenários *forward* do caso 12 REEs.

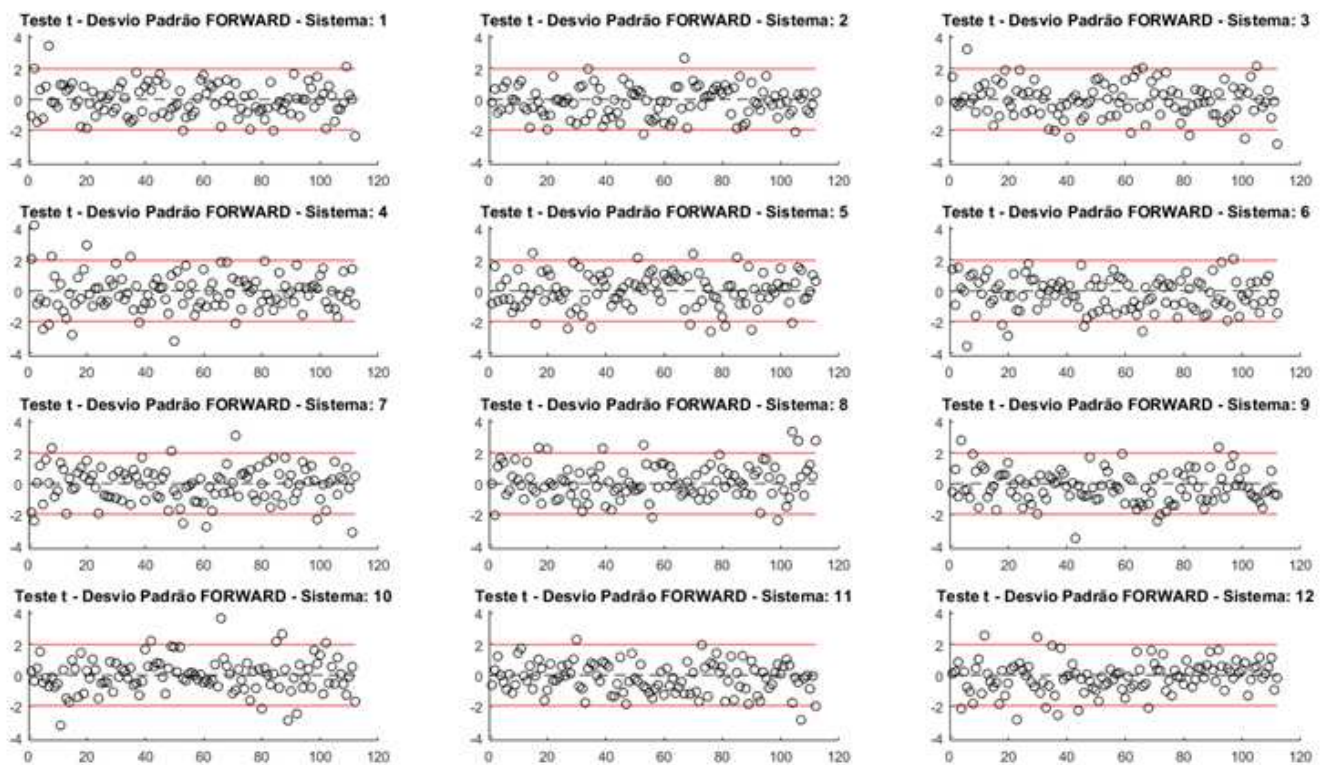


Figura 2.4 - Ilustração do teste t, para o desvio padrão dos cenários *forward* do caso 12 REEs.

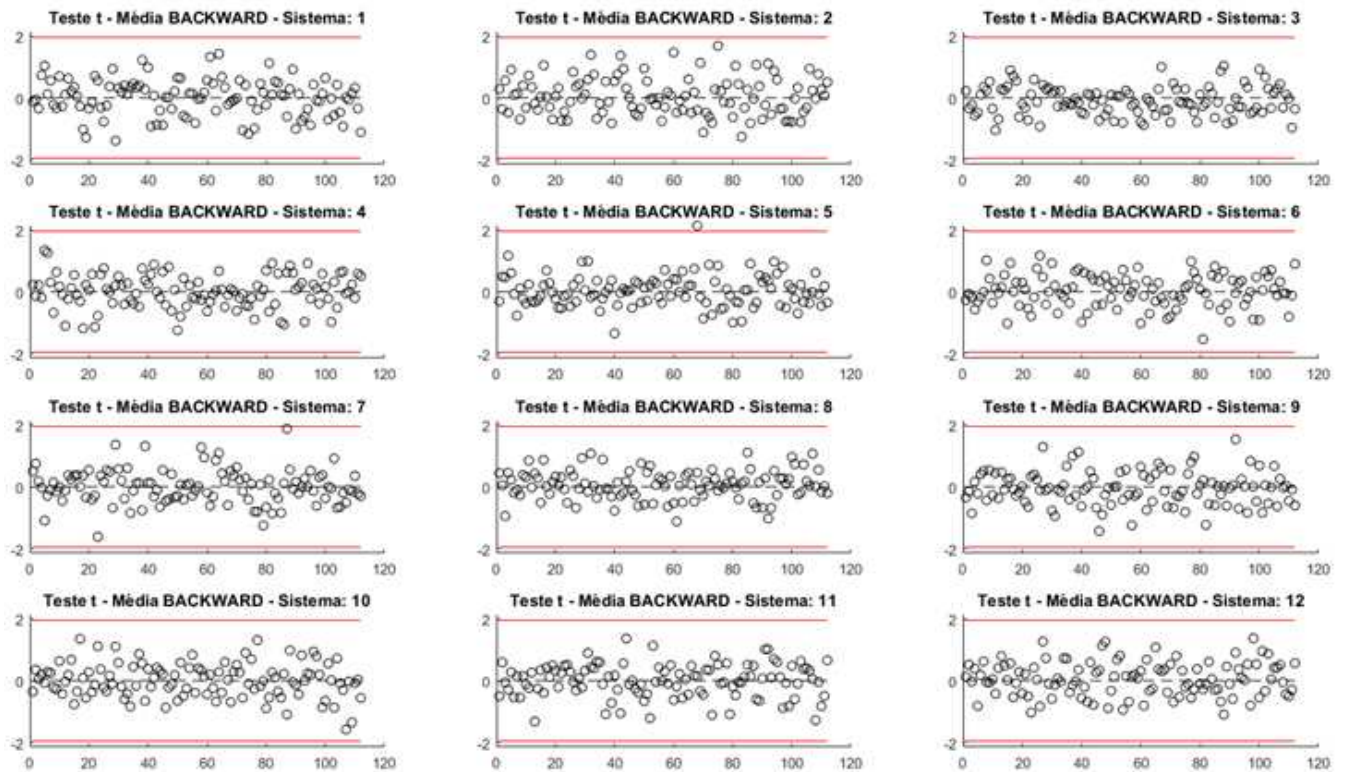


Figura 2.5 – Ilustração do teste t, para a média dos cenários *backward* do caso 12 REEs.

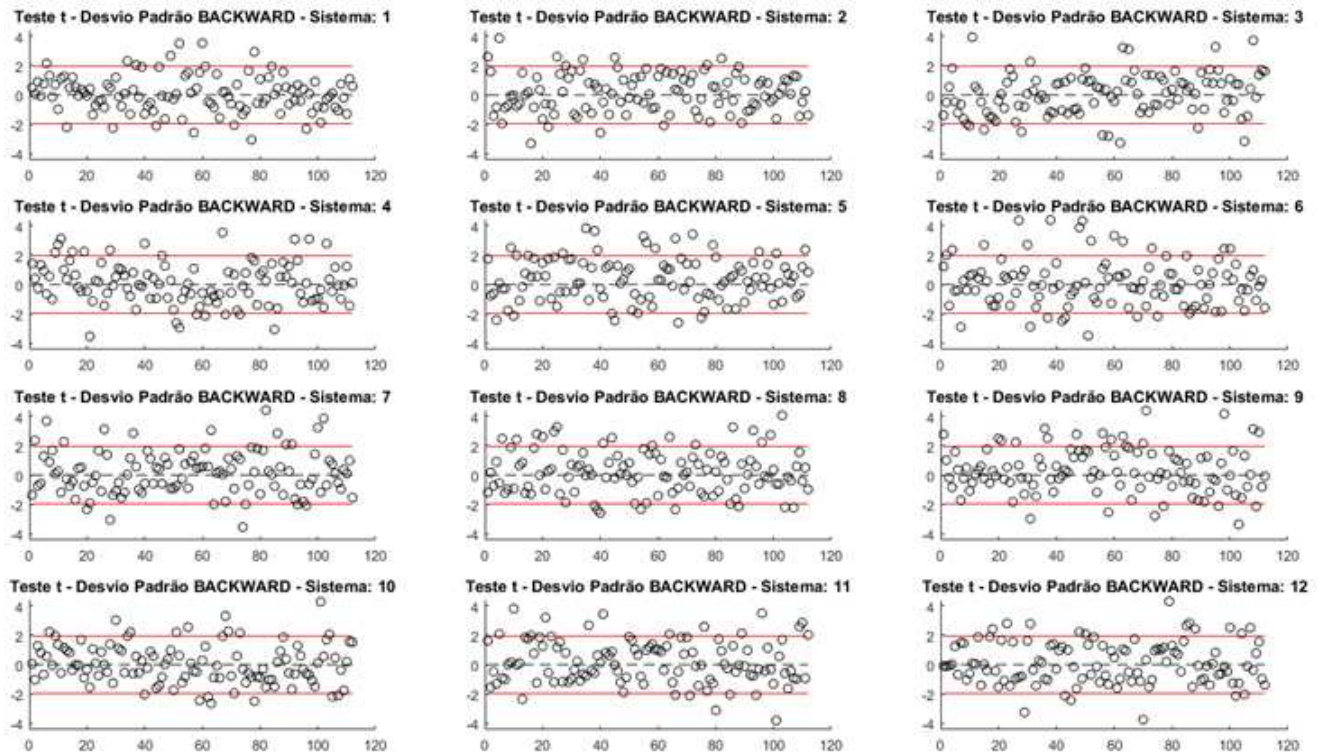


Figura 2.6 - Ilustração do teste t, para o desvio padrão dos cenários *backward* do caso 12 REEs.

Apresenta-se ainda, na Figura 2.7 e Figura 2.8, o teste Kolmogorov-Smirnoff (teste KS) para os cenários *forward* e *backward* do caso 12 REEs. Novamente, verifica-se a boa aderência das amostras aos testes realizados.

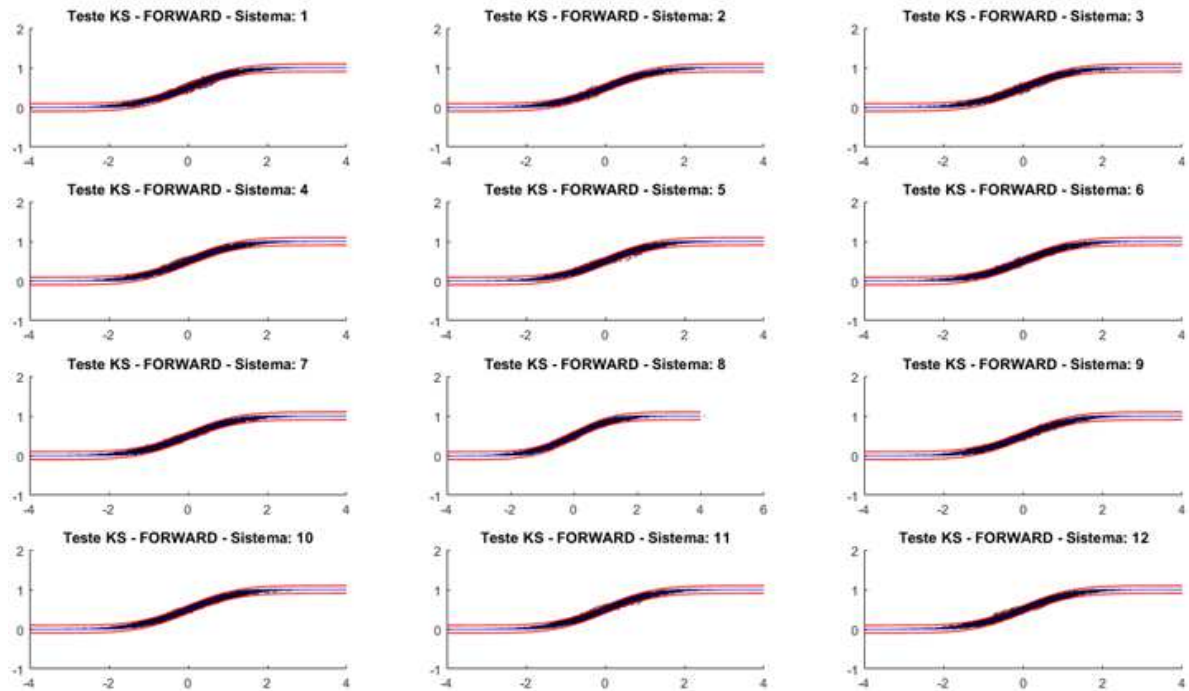


Figura 2.7 - Teste Kolmogorov-Smirnoff (KS), para os cenários forward do caso 12 REEs.

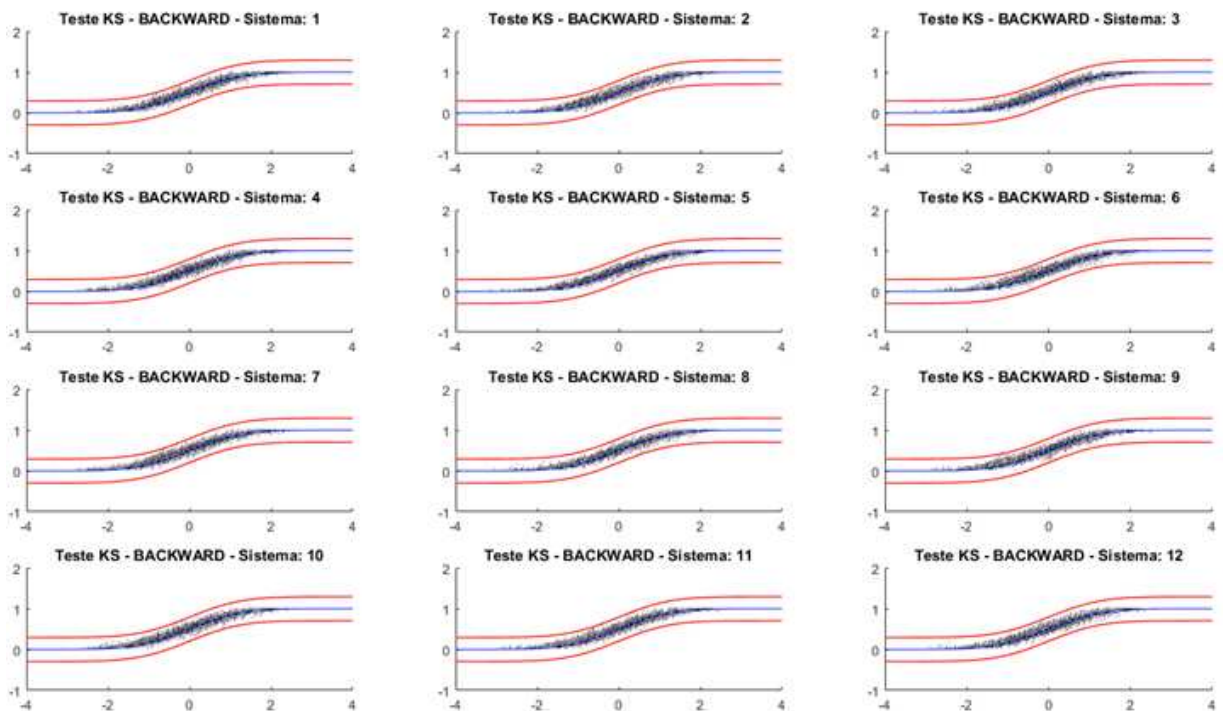


Figura 2.8 - Teste Kolmogorov-Smirnoff (KS), para os cenários backward do caso 12 REEs.

2.3 Rodadas determinísticas

Outra análise consistiu em executar os casos 9 e 12 REEs para os PMOs de Setembro de Outubro de 2017 no modo “determinístico”, ou seja, otimizando cada uma das séries do histórico. O objetivo desta análise é verificar se os valores do limite inferior da solução ótima (ZINF) e do limite superior da solução ótima (ZSUP) se igualam, o que indicaria a inexistência de problemas conceituais ou de implementação computacional.

Todos os casos analisados (aproximadamente 80 casos para cada PMO) convergiram, com valores de limite inferior da solução ótima (ZINF) iguais aos do limite superior da solução ótima (ZSUP), dentro de uma tolerância muito rígida.

2.4 Análise da inflexão ocorrida na evolução temporal do valor esperado dos CMOs

A Figura 2.9 ilustra a evolução da média dos custos marginais mensais de operação do PMO de Setembro de 2017, ao longo do período de planejamento. Verifica-se que do sexto mês até o fim do horizonte as evoluções, considerando-se 9 e 12 REEs, são muito próximas. No quinto mês do horizonte (neste PMO, refere-se ao mês de janeiro de 2018) observa-se um declínio desta variável quando da simulação com 12 REEs, que se torna acentuado quando se analisa o quarto mês. Este mesmo comportamento é observado para o de Outubro de 2017, Figura 2.10.

Este comportamento do CMO médio mensal motivou uma avaliação das ENAs dos cenários *backward* e *forward* utilizados no processo do cálculo da política ótima de operação.

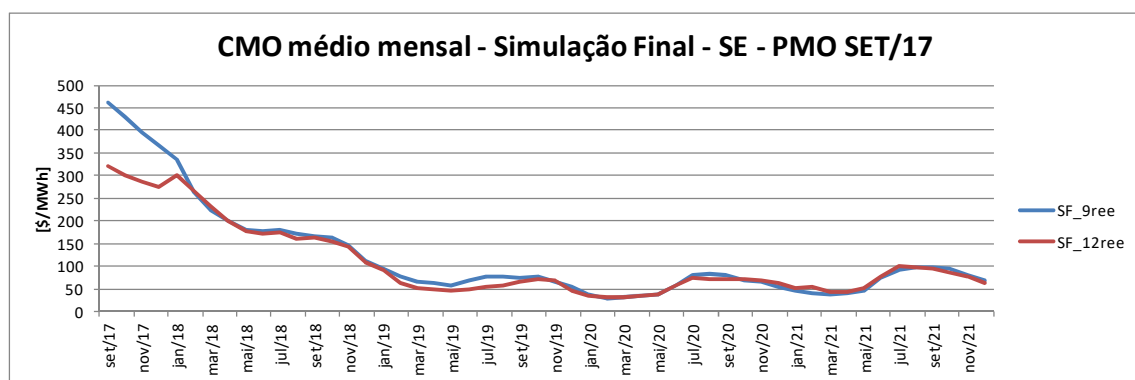


Figura 2.9 - Comparação CMO entre 9REEs e 12REEs do PMO de Setembro de 2017

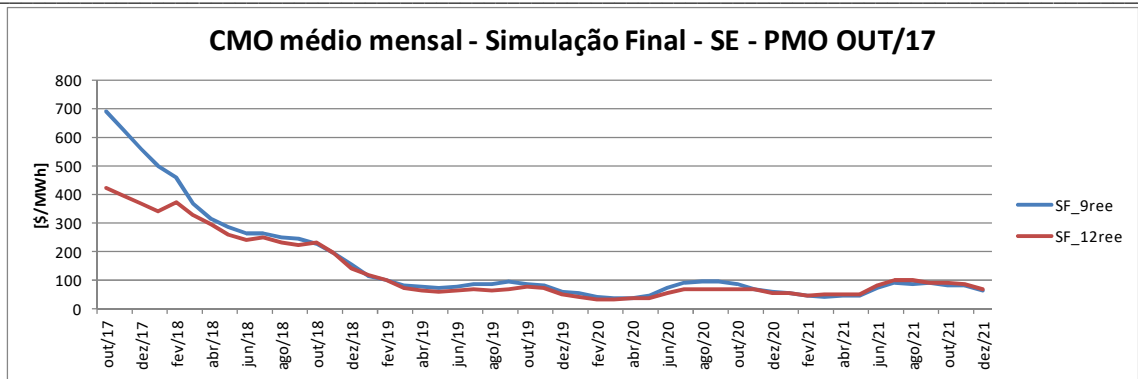


Figura 2.10 - Comparação CMO entre 9REEs e 12REEs do PMO de Outubro de 2017

A Figura 2.11 apresenta a distribuição de frequências acumuladas (dfa) das ENAs da recursão *backward* associadas a todos os cenários *forward* entre os meses de Outubro/2017 a Dezembro/2018 para o PMO de Setembro de 2017. Nota-se que em geral existe uma grande aderência entre os casos 9 e 12 REEs, exceto nos meses de Janeiro/2018 e Fevereiro/2018, conforme destacado na Figura 2.12.

De forma análoga, a Figura 2.13 apresenta a distribuição de frequência acumulada das ENAs dos cenários *forward* dos meses de Outubro/2017 a Dezembro/2018. Novamente, observa-se uma menor aderência entre as distribuições dos meses Janeiro/2018 e Fevereiro/2018, conforme apresentado na Figura 2.14.

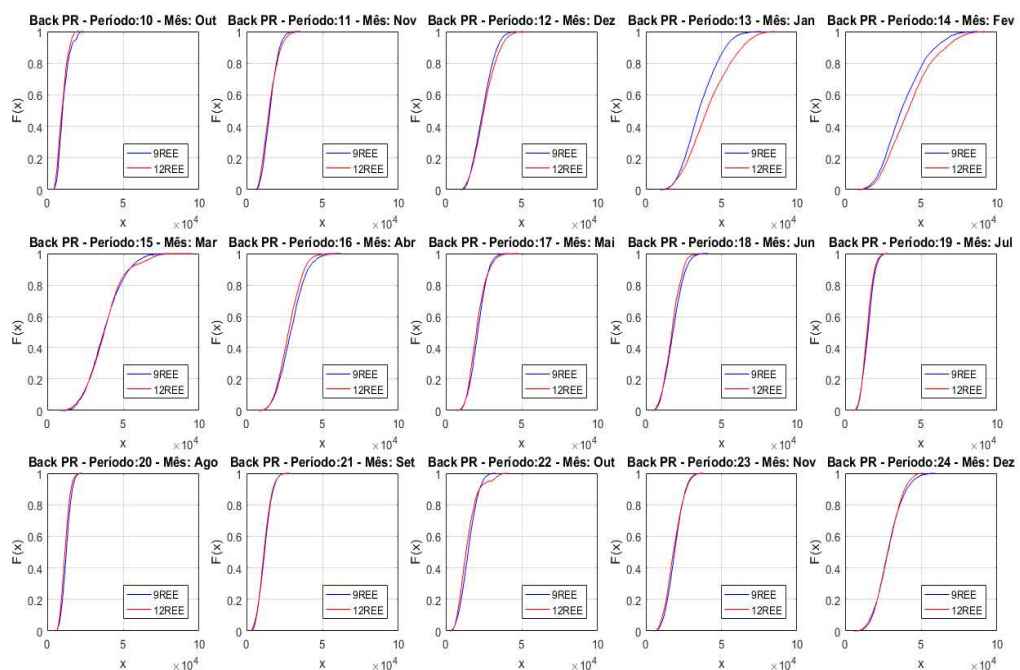


Figura 2.11 – Distribuição de frequências das ENAs da *backward* - Out/2017 a Dez/2018

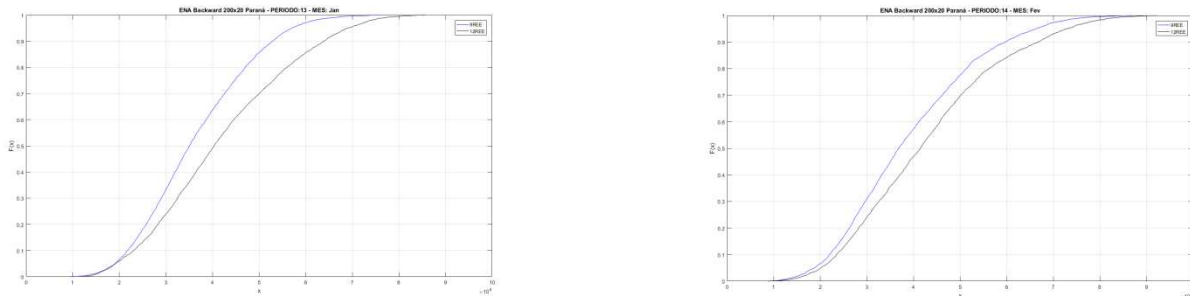


Figura 2.12 – Destaque para Jan e Fev/2018 – recursão *backward*

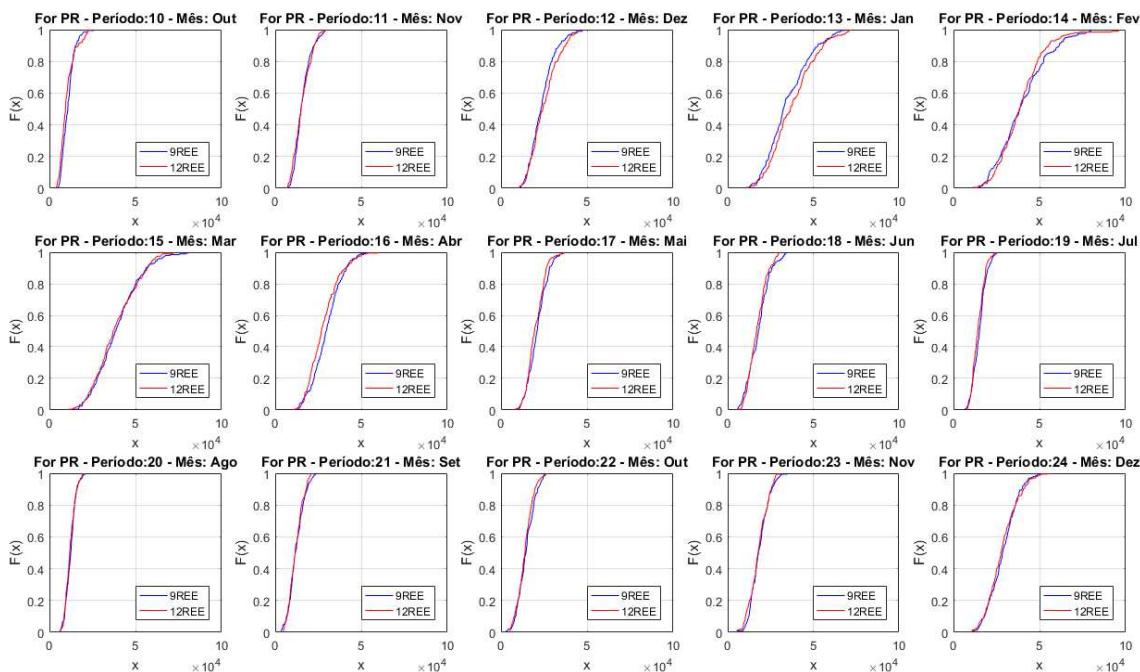


Figura 2.13 – Distribuição de frequências das ENAs da *forward* - Out/2017 a Dez/2018

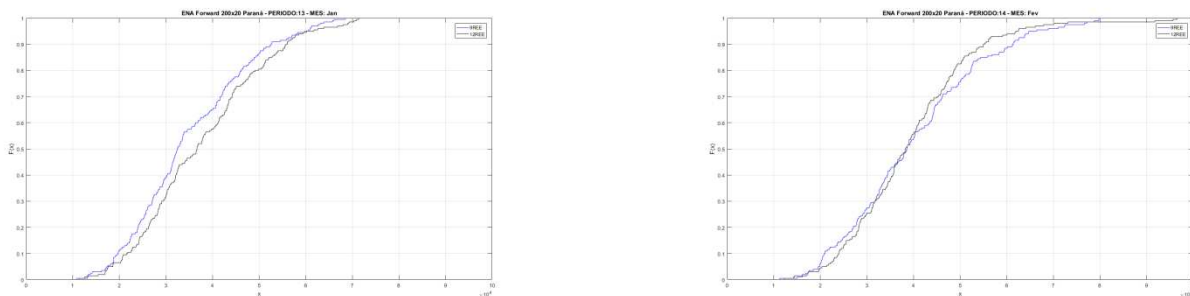


Figura 2.14 – Destaque para Jan e Fev de 2018 – recursão *forward*

Nos meses de Janeiro/2018 e Fevereiro/2018 é possível observar uma frequência maior de valores baixos na distribuição das ENAs do caso de 9 REEs do que no caso de 12 REEs. Valores de ENAs mais baixos implicam em maior possibilidade do algoritmo da PDDE visitar estados mais críticos durante as simulações *forward* e conseqüentemente que sejam calculados mais cortes de Benders para esta região, o que acarretaria em uma política de operação (conjunto de funções de custo futuro) mais restritiva e, em decorrência, maiores custos marginais de operação (CMO).

O impacto no CMO da diferença nos valores de ENA é agravado devido às condições iniciais de armazenamento, muito pouco favoráveis para estes PMOs. Isto pode ser corroborado a partir da Figura 2.15 a Figura 2.18, que mostram as distribuições de frequência acumuladas das ENAs *backward* e *forward* dos anos 2019 e 2020. Para esses dois anos, as distribuições dos meses de Janeiro e Fevereiro também apresentam uma menor aderência; no entanto os CMOs dos casos 9 e 12 REEs são semelhantes nestes períodos.

Já no ano 2021, não se observam diferenças relevantes entre as distribuições de ENAs da *backward* inclusive para estes dois meses, conforme ilustrado na Figura 2.19. As diferenças observadas entre as duas distribuições da ENA *forward* na Figura 2.20 estão na mesma magnitude daquelas observadas para 2020.

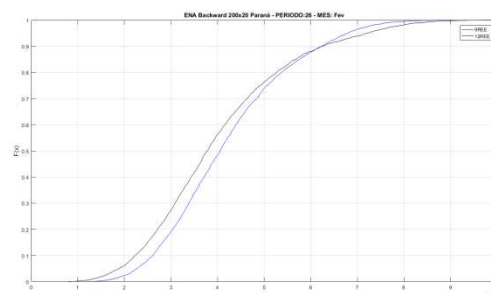
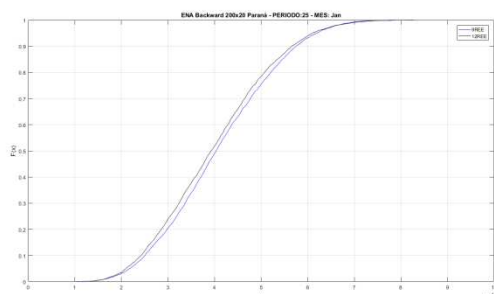


Figura 2.15 – Destaque para Jan e Fev de 2019 – recursão backward

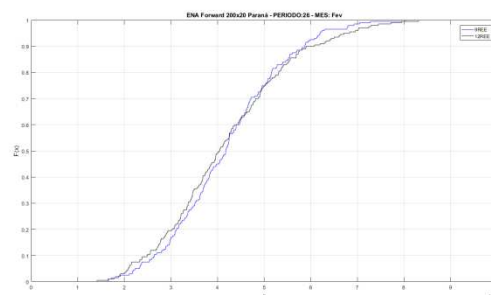
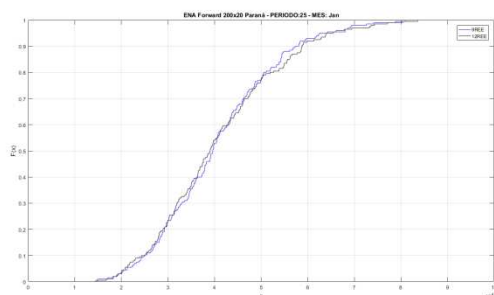


Figura 2.16 – Destaque para Jan e Fev de 2019 - recursão forward

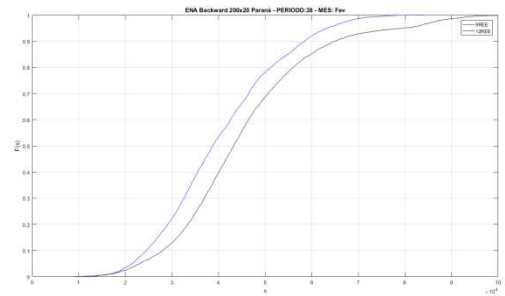
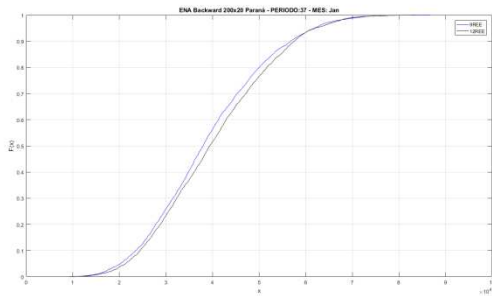


Figura 2.17 – Destaque para Jan e Fev de 2020 - *recursão backward*

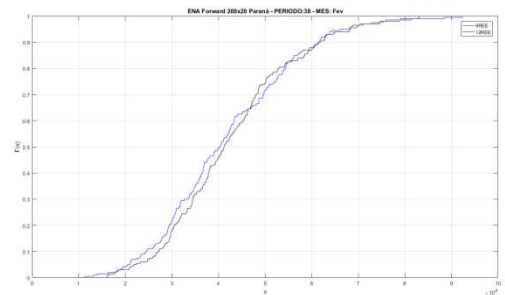
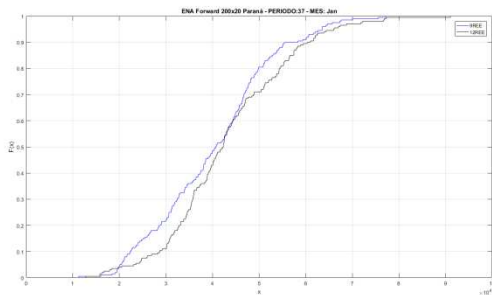


Figura 2.18 – Destaque para Jan e Fev de 2020 - *recursão forward*

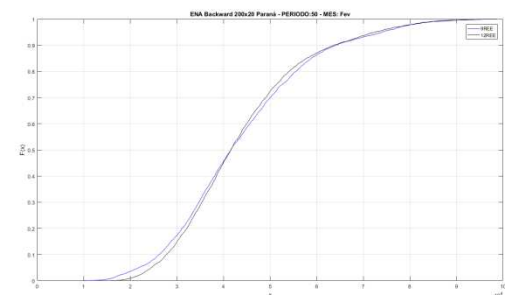
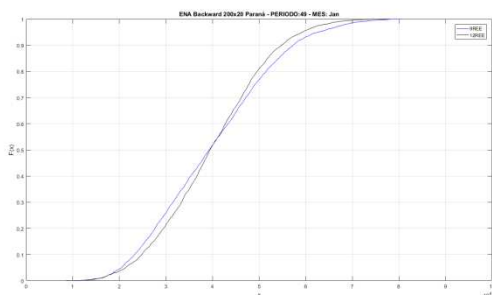


Figura 2.19 – Destaque para Jan e Fev de 2021 - *recursão backward*

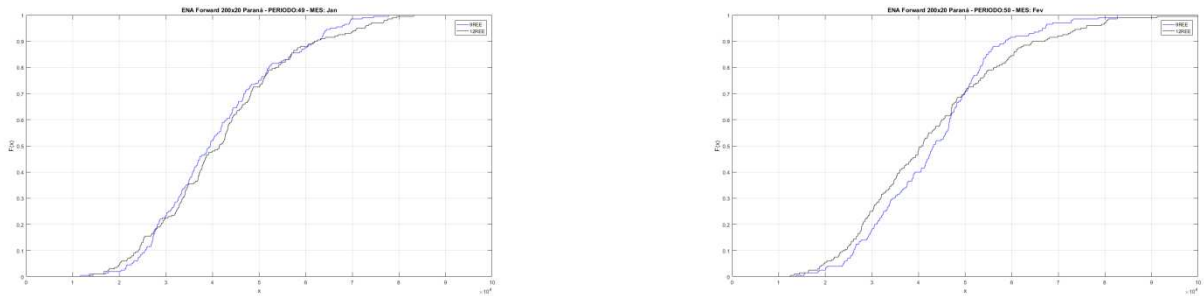


Figura 2.20 – Destaque para Jan e Fev de 2021 - *recursão forward*

3 LEVANTAMENTO DAS CAUSAS DA REDUÇÃO DO CMO

3.1 Complementaridade hidrológica entre os REEs Paraná e Paranapanema

A Figura 3.1(a) ilustra a complementaridade hidrológica que existe entre os REEs Paraná e Paranapanema, especialmente entre os meses de Maio a Dezembro, onde as legendas PR12 e PP12 denotam as MLTs dos REEs Paraná e Paranapanema, respectivamente, e a legenda PR9 denota a soma das MLTs destes REEs. Para fins de comparação, a Figura 3.1(b) ilustra os dois REEs que compõem a região Sul no caso 9 REEs (Sul9), e que foram divididos no caso 12 REEs (Sul12 e Iguaçu). Comparando os dois gráficos percebe-se que a questão da complementaridade é bem marcante no caso dos REEs Paraná e Paranapanema.

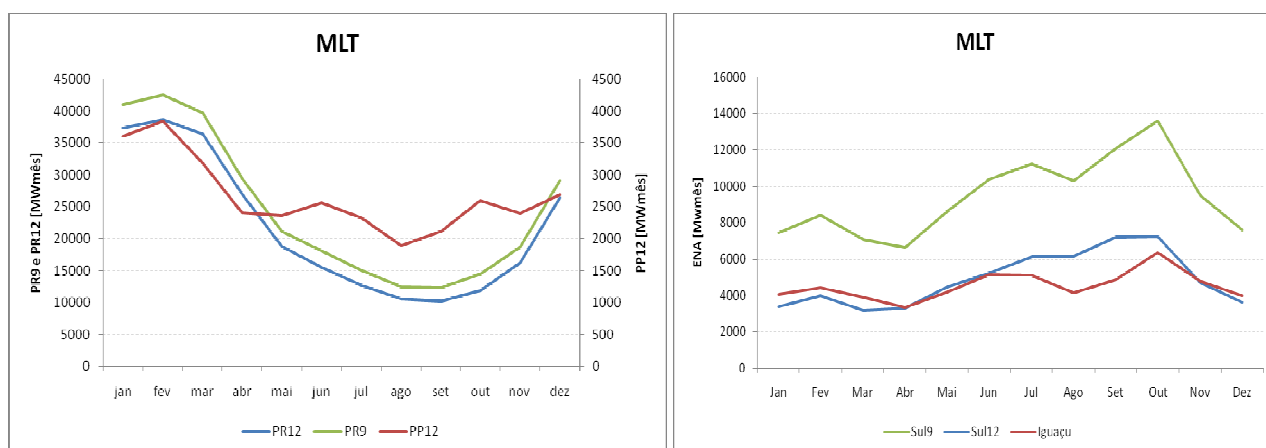


Figura 3.1 - Complementaridade hidrológica entre os regimes (a) Paraná e Paranapanema e (b) Sul e Iguaçu, entre os meses de Maio a Dez.

A Figura 3.2 mostra a grande diferença na tendência hidrológica inicial, em termos relativos, entre os dois REEs do caso 12 REEs (PR12 e PP12) e o REE que representa a soma dos REEs Paraná e Paranapanema (PR9) do caso 9 REEs, para o PMO de Setembro de 2017. Adicionalmente, na Tabela 3.1 apresenta as capacidades de armazenamento e as energias armazenadas iniciais dos REEs Paraná e Paranapanema, tanto para o caso 12 REEs quanto para 9 REEs.

Apesar da capacidade de armazenamento do REE Paranapanema se situar em torno de 9% da capacidade do REE Paraná, a combinação entre um estado inicial desfavorável e a complementariedade pode impactar a política de operação, tendo como consequência a redução dos custos marginais de operação, conforme detalhado a seguir.

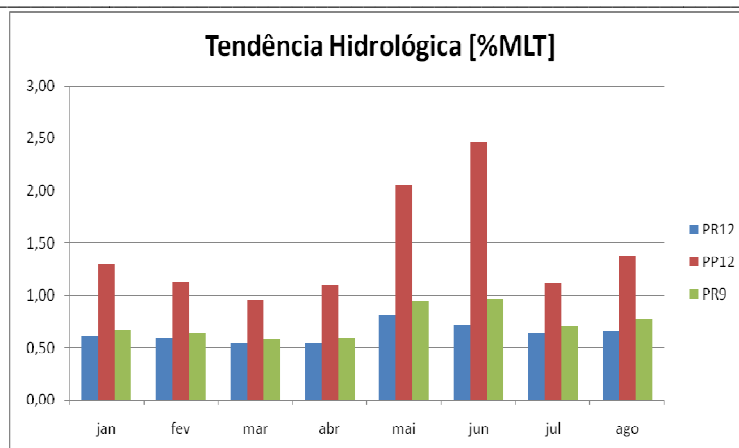


Figura 3.2 – Tendência hidrológica dos REEs Paraná (PR) e Paranapanema (PP) para o caso 12 REEs, quando comparada à tendência hidrológica do conjunto, no caso 9 REEs.

Tabela 3.1 – Capacidade de armazenamento e armazenamento inicial

PMO SET/17	PR12	PP12	PR9
EARMx (MWmês)	140190.0	12055.7	152245.7
EARMi (MWmês)	48826.9	8986.1	57813.0
EARMi (%EARMx)	34.8%	74.5%	38.0%

A fim de mensurar melhor o real impacto da complementaridade hidrológica entre os REEs Paraná e Paranapanema, criou-se um caso “ad-hoc”, onde as vazões do Paranapanema seguiam estritamente o comportamento do REE Paraná, ou seja, a correlação entre ambas as vazões foi feita forçadamente igual a 1. Desta forma, o comportamento hidrológico entre os casos 9 REEs e 12 REEs seria bastante semelhante, e a diferença entre os dois casos se daria apenas por questões de topologia.

A Figura 3.3 e a Figura 3.4 apresentam o valor esperado do custo total de operação (COPER) e do CMO, respectivamente, entre esse caso “ad-hoc” (última barra à direita) e os casos originais com 9REEs e 12REEs, para os PMOs de Setembro e Outubro de 2017. Pode-se perceber que, ao se eliminar a complementaridade, os valores de COPER e CMO do caso com 12 REEs ficam mais próximos ao do caso com 9 REEs, evidenciando que a complementaridade hidrológica contribui para a redução do CMO no caso 12 REEs.

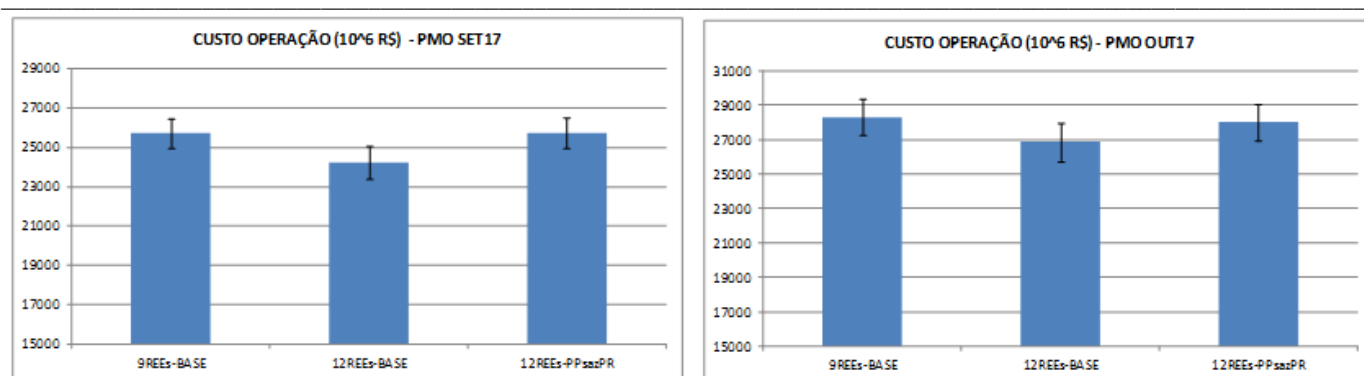


Figura 3.3 - Variação do custo total de operação ao se eliminar a complementaridade hidrológica entre os REEs Paraná (PR) e Paranapanema (PP) – PMOs de Set/17 e Out/17.

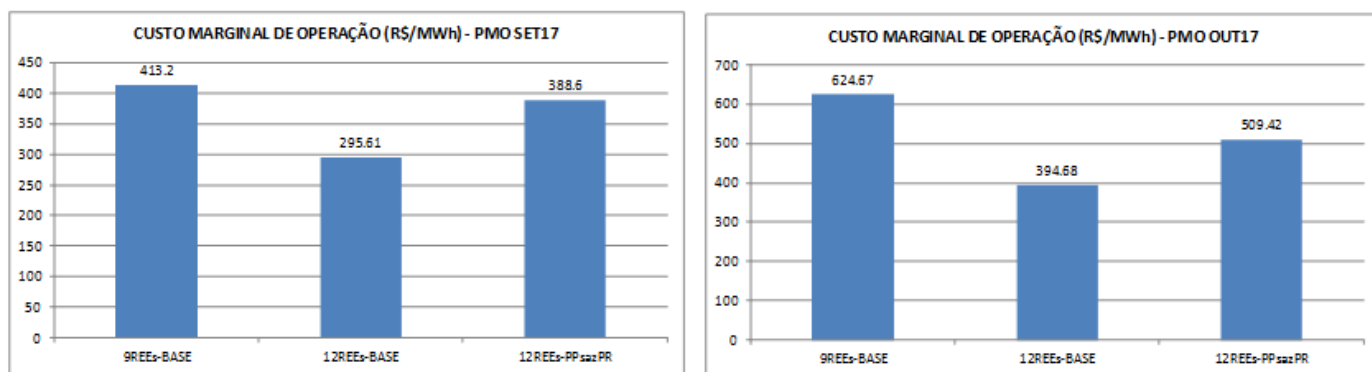


Figura 3.4 - Variação do custo marginal de operação ao se eliminar a complementaridade hidrológica entre os REEs Paraná (PR) e Paranapanema (PP) – PMOs de Set/17 e Out/17.

Conceitualmente, a redução do CMO entre os casos 9 REEs e 12 REEs originais pode ser explicada pelo fato de que a complementaridade hidrológica entre os regimes do Paraná e Paranapanema é benéfica para o caso 12 REEs, no sentido de que baixas vazões em um REE podem ser compensadas por vazões mais altas no outro REE. Isto evita que o sistema atinja condições mais críticas, o que ocorre com mais frequência no caso 9 REEs, onde ambas as bacias estão em um mesmo reservatório equivalente e, portanto, sujeitas a uma correlação perfeita para as vazões às suas usinas.

3.2 Capacidade de armazenamento do REE Paranapanema (PP)

Quando se comparam as energias armazenáveis máximas, verifica-se que a capacidade do REE Paranapanema é cerca de 11 vezes menor do que a capacidade do REE Paraná. Assim, ao separar a bacia do Paranapanema no caso 12 REEs, a parcela controlável da energia natural afluyente do REE Paranapanema pode fazer com que o limite de armazenamento desse REE seja atingido com maior

probabilidade. Já no caso 9 REEs, a parcela controlável da energia natural afluyente do REE Paranapanema conta também com a capacidade de armazenamento do Paraná, muito mais elevada, para ser estocada. Como consequência, já que há uma maior probabilidade de vertimento no REE Paranapanema no caso 12 REEs, a política operativa deste caso leva a uma maior defluência no REE Paranapanema, para evitar vertimentos futuros. Isto causa uma geração maior da usina de Itaipu, que está no REE de jusante e que não tem capacidade de armazenamento, levando a uma redução do CMO. Este impacto no CMO é mais significativo quando o subsistema Sudeste está em situações mais críticas, como as dos PMOs em análise, pois nessa situação o caso com 9 REEs dificilmente chegará a sua capacidade de armazenamento, enquanto o REE Paranapanema, pelo seu tamanho reduzido, continua tendo possibilidades de vertimento, no caso 12 REEs.

A fim de verificar essa suposição, foi elaborada uma análise de sensibilidade onde se aumentou o volume armazenado máximo das usinas do REE Paranapanema (de 12.055 MWh para 25.030 MWh, aumento de 107%²), e cujos resultados são apresentados nas duas últimas barras dos gráficos de COPER e CMO da Figura 3.5. Como esperado, ao se aumentar o volume máximo das usinas, observa-se uma redução do COPER e do CMO em ambos os casos 9 e 12 REEs. No entanto, nota-se que a diferença entre eles diminui nesta nova situação com maior capacidade de armazenamento no REE Paranapanema.

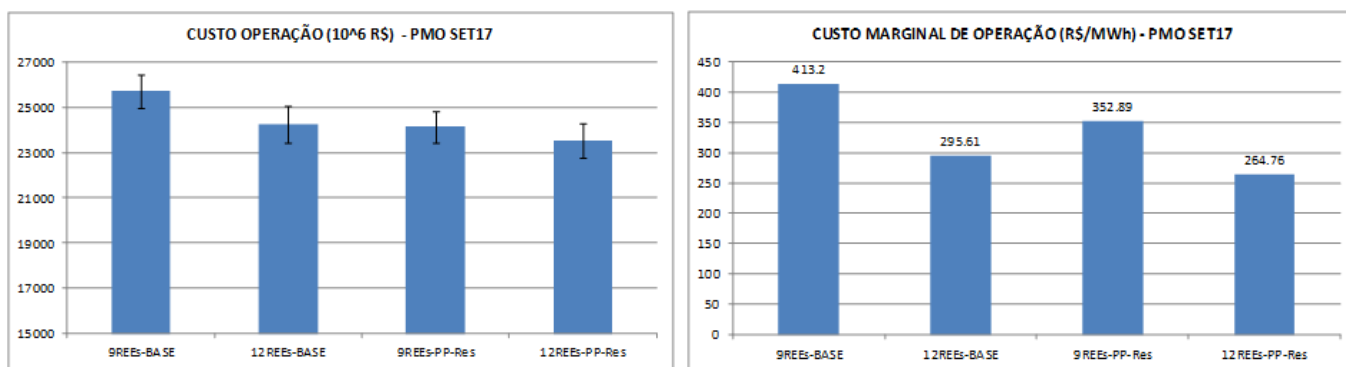


Figura 3.5 - Comparação do custo de operação e CMO nos casos 9 e 12 REEs, para o PMO de Set/17, aumentando-se artificialmente o armazenamento máximo no REE Paranapanema.

² O aumento do volume armazenado foi realizado respeitando-se a validade do polinômio cota-volume.

4 Análise do impacto da variação amostral na redução do CMO

Em um Processo Estocástico, a incerteza em alguns dados de entrada (no caso do planejamento hidrotérmico, as vazões afluentes às usinas hidroelétricas) pode ser representada por um conjunto de cenários, que é finito por questões de esforço computacional. Estes cenários devem, tanto quanto possível, representar as características estatísticas do processo estocástico original, que consiste em uma variável aleatória contínua.

Como é impossível acessar toda a população, faz-se necessário utilizar uma amostra para representá-la, cuja qualidade depende do tamanho desta amostra e da representatividade dos valores amostrados. Como consequência, todo processo de amostragem compreende, intrinsecamente, uma variação amostral.

No modelo NEWAVE, o problema de planejamento da operação de longo e médio prazo é resolvido pelo algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) [6], [7], onde a árvore de cenários é representada pelos cenários da recursão *backward* e a função de custo futuro é construída nos estados fornecidos pela simulação *forward*. A cada período do horizonte de estudo são considerados NLEQ cenários *backward* e NSIM cenários *forward*, atualmente iguais a 20 e 200, respectivamente.

A geração de cenários é realizada pelo modelo GEVAZP utilizando uma estratégia denominada amostragem seletiva [4], que aplica técnicas de agregação de cenários a uma amostra original de ruídos aleatórios, conforme ilustrado na Figura 4.1.

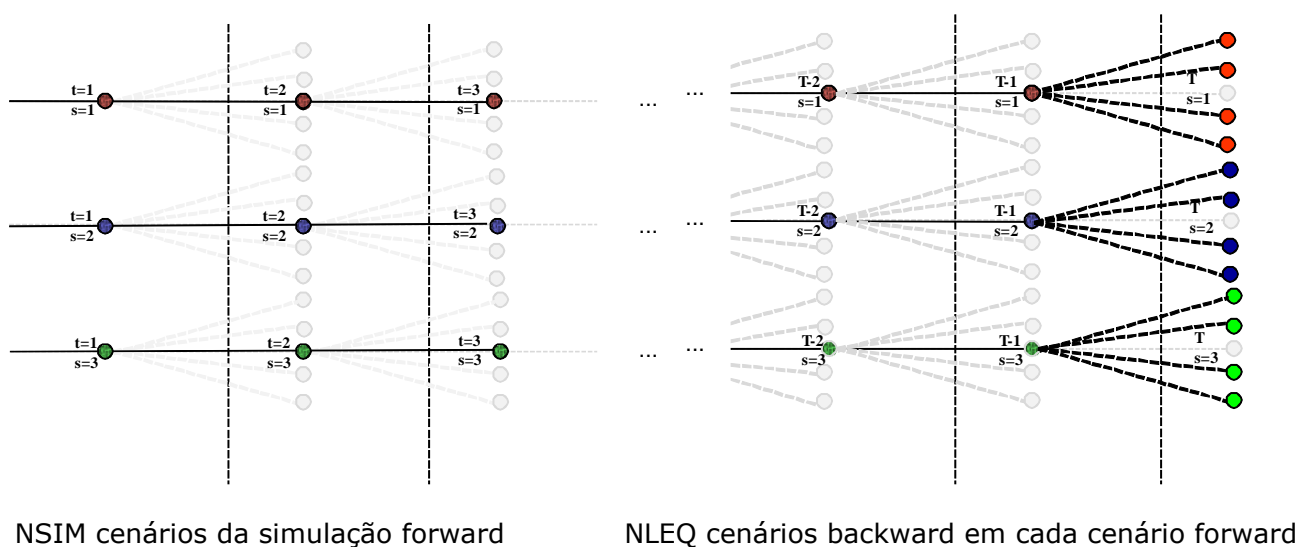


Figura 4.1 – Representação da árvore de cenários para a simulação *forward* e a recursão *backward*.

O efeito da variação amostral na dispersão das amostras dos ruídos, assim como, nos valores de COPER e CMO, ao aumentar o número de REEs de 9 para 12, com relação aos parâmetros NLEQ e NSIM, será apresentado nas seções a seguir.

4.1 Análise da dispersão dos ruídos da recursão *backward*

4.1.1 Efeito do aumento no número de REEs

A Figura 4.2 até a Figura 4.7 apresentam a dispersão da média da amostra de NLEQ=20 ruídos utilizados para a geração dos cenários *backward*, para cada REE, ao longo do horizonte de estudo, considerando configurações do SIN com 4, 9 e 12 REEs.

Como era de se esperar, a dispersão dos ruídos aumenta à medida que cresce o número de REEs, pois se manteve o mesmo tamanho da amostra para representar árvores de cenários com dimensões mais elevadas. No entanto, do ponto de vista pragmático, este aumento é controlado, pois se observa que as médias dos ruídos se encontram dentro dos respectivos intervalos de confiança, para todas as configurações de REEs.

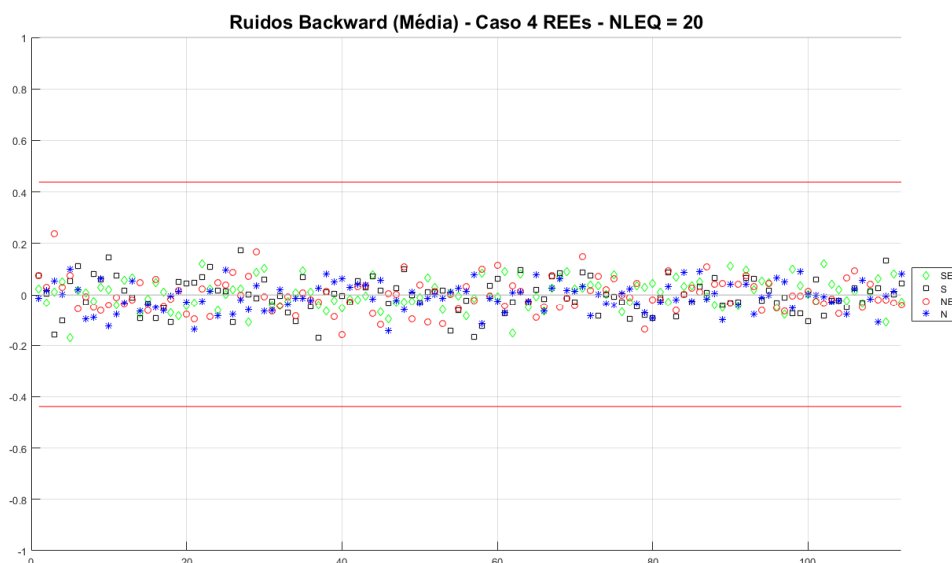


Figura 4.2 - Dispersão dos ruídos *backward* (média) para o caso com 4 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200)

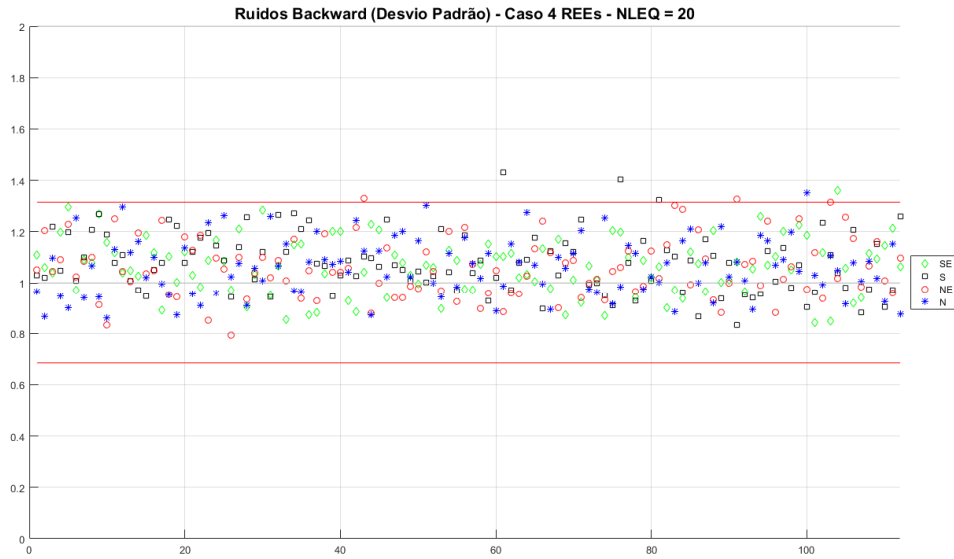


Figura 4.3 - Dispersão dos ruídos *backward* (desvio-padrão), para o caso com 4 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200)

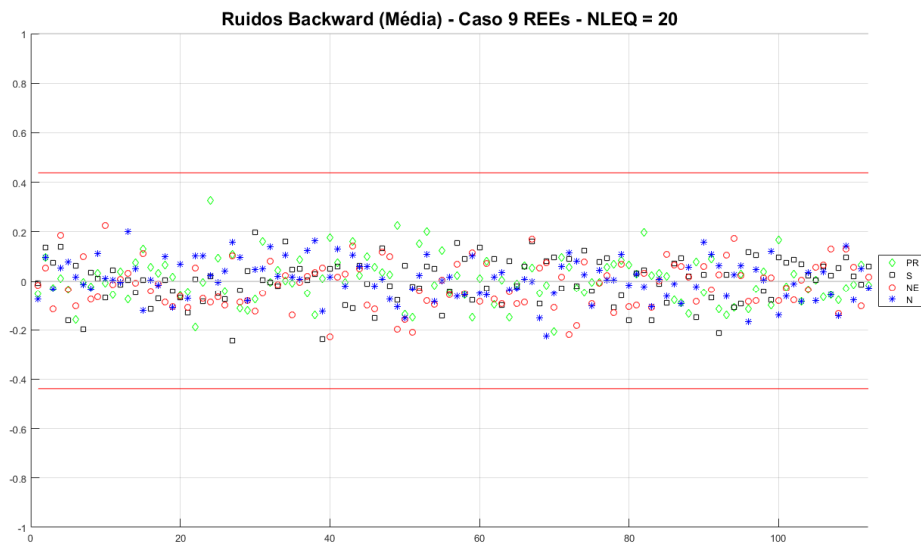


Figura 4.4 - Dispersão dos ruídos *backward* (média) para o caso com 9 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200)

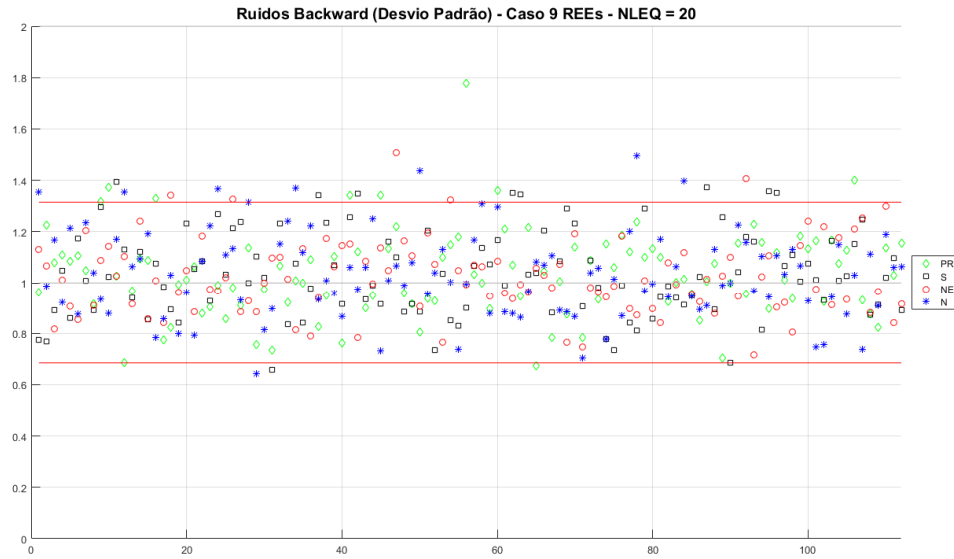


Figura 4.5 - Dispersão dos ruídos *backward* (desvio-padrão) para o caso com 9 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200)

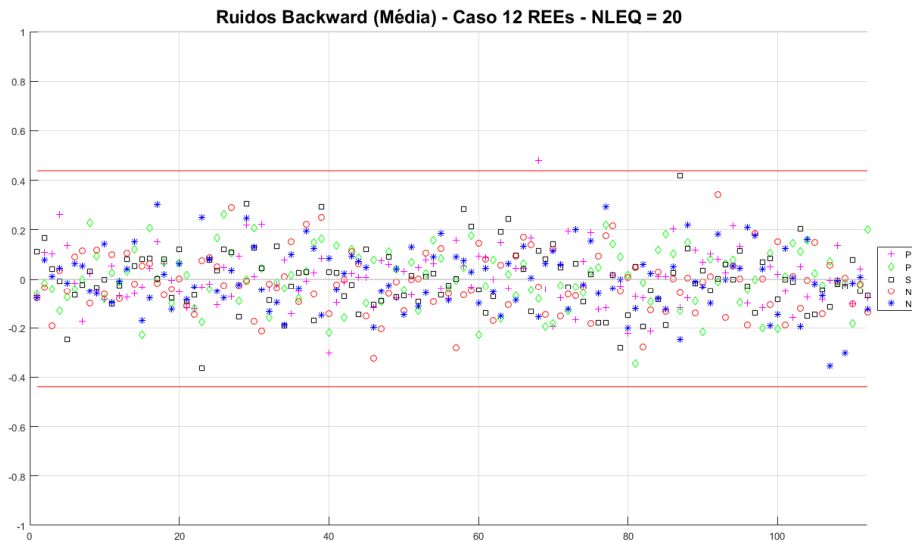


Figura 4.6 - Dispersão dos ruídos *backward* (média) para o caso com 12 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200)

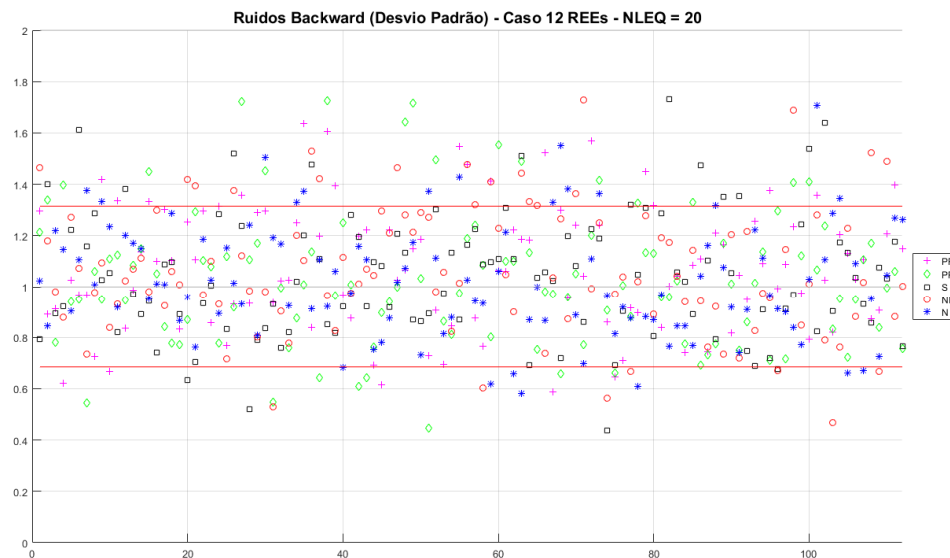
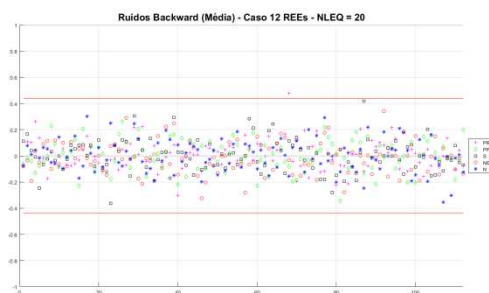
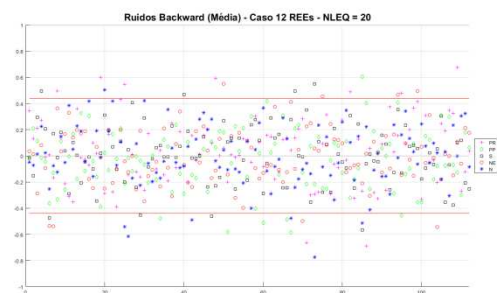


Figura 4.7 - Dispersão dos ruídos *backward* (desvio-padrão) para o caso com 12 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200).

Apesar da maior dispersão das médias dos ruídos para o caso 12 REEs, esta é inferior àquela obtida com a aplicação da amostragem aleatória simples, conforme pode ser observado na Figura 4.8. Esta análise corrobora a superioridade da amostragem seletiva em relação à amostragem aleatória simples para representação dos cenários *backward*.



Amostragem Seletiva



Amostragem Aleatória Simples

Figura 4.8 - Comparação entre as dispersões com uso das amostragens seletiva e aleatória simples

4.1.2 Efeito do aumento no número de cenários da recursão *backward*

Nesta seção é apresentado o efeito do aumento da amostra de ruídos *backward* na variabilidade amostral da média dos ruídos para os REEs ao longo do horizonte de estudo. Na Figura 4.9 a Figura

4.11 observa-se que, à medida que o número de cenários *backward* aumenta, ocorre uma redução da variabilidade amostral. Pode-se verificar ainda que para valores de NLEQ entre 30 e 40, a variabilidade amostral retorna ao nível observado para a configuração atual de 9 REEs com NLEQ=20, conforme ilustrado conjuntamente, para facilitar a comparação, na Figura 4.12 a Figura 4.13.

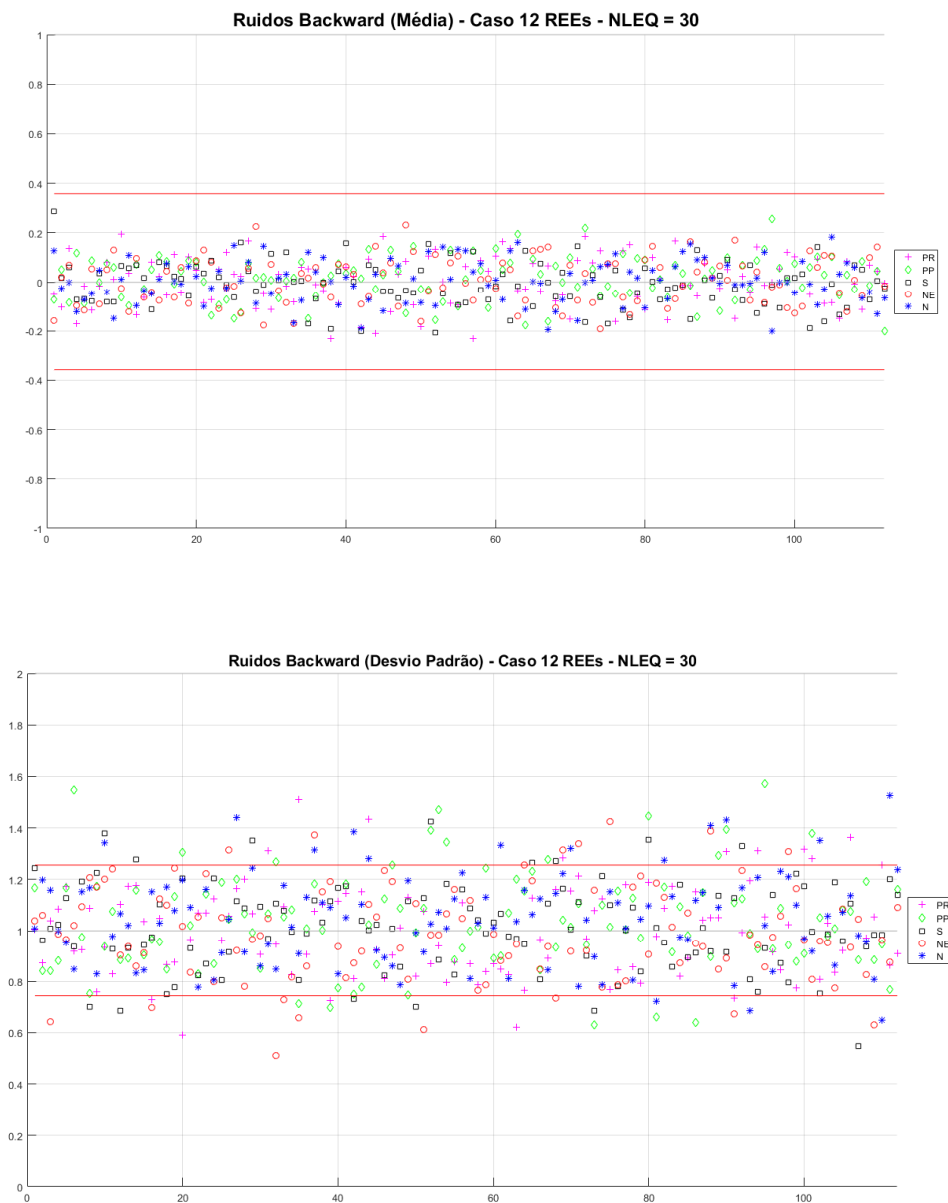


Figura 4.9 - Dispersões dos ruídos *backward* para o caso 12 REEs, com NLEQ=30.

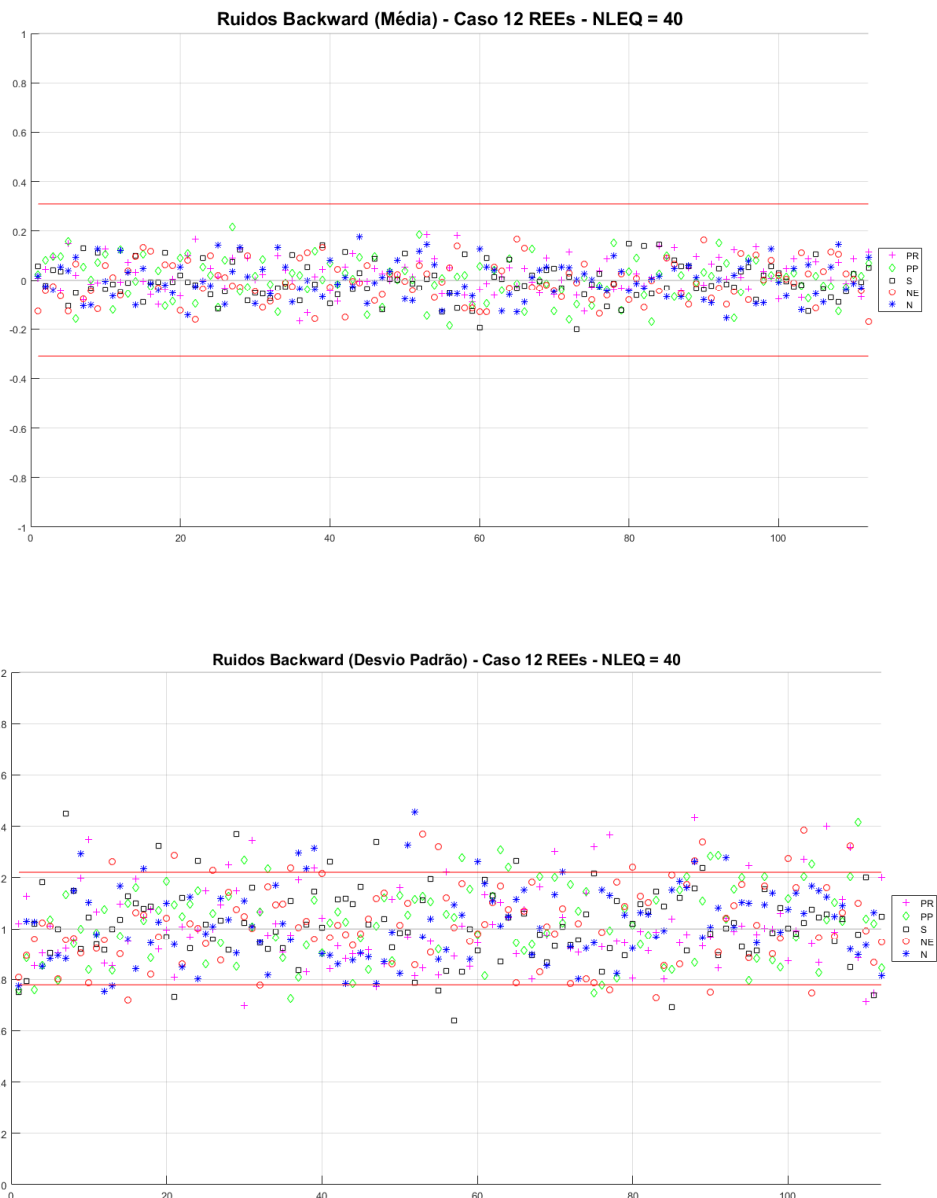


Figura 4.10 - Dispersões dos ruídos *backward* para o caso 12 REEs, com NLEQ=40.

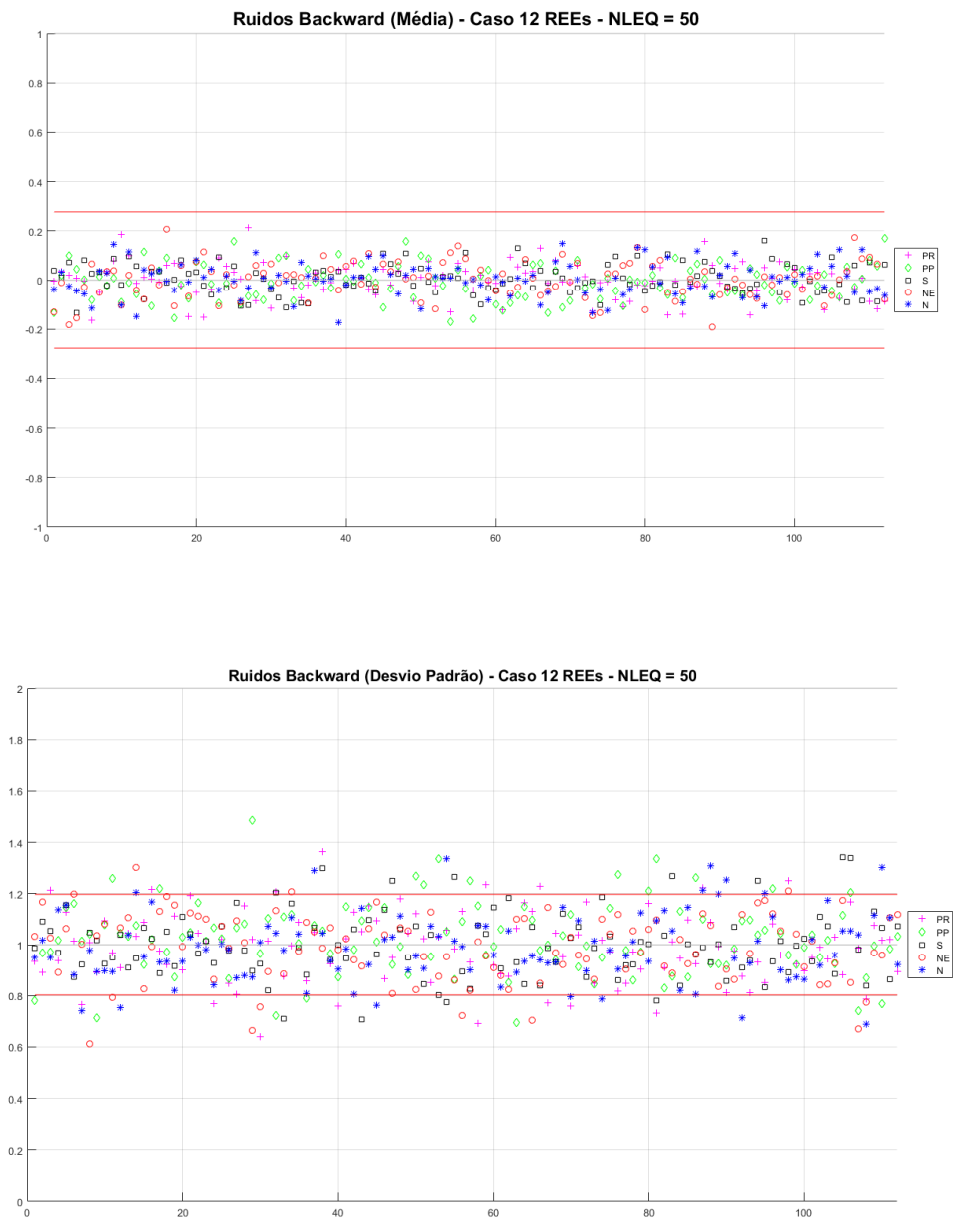


Figura 4.11 - Dispersões dos ruídos *backward* para o caso 12 REEs, com NLEQ=50.

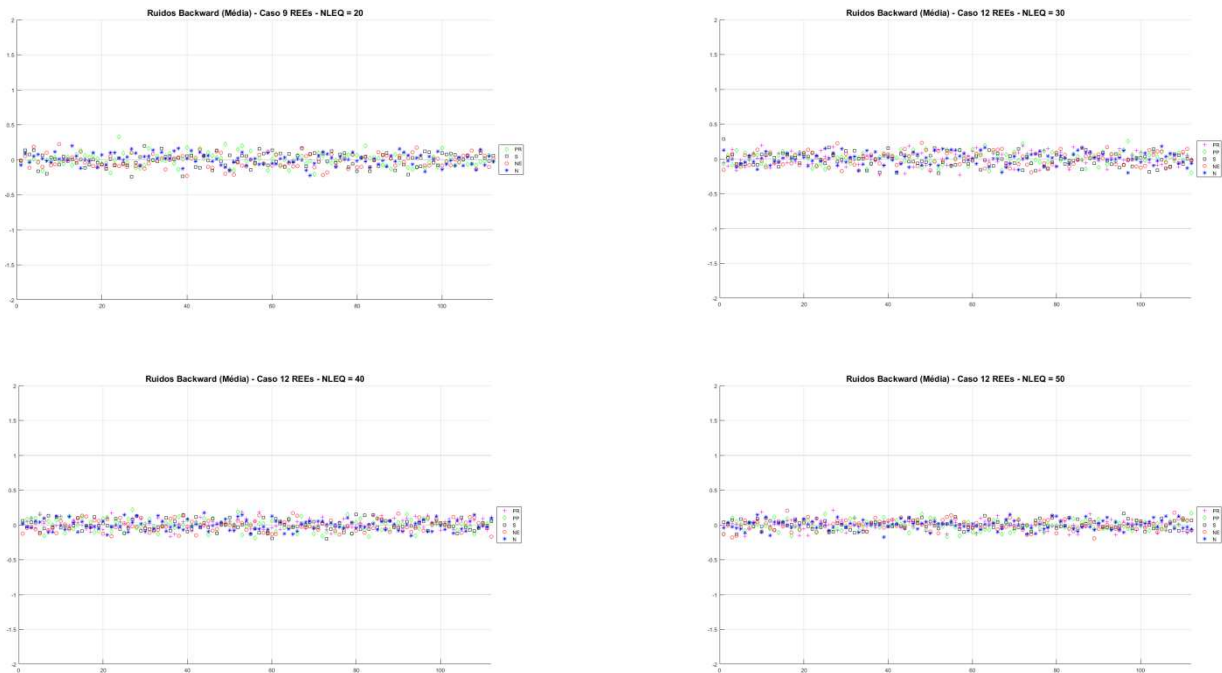


Figura 4.12 – Comparação dispersões das médias dos ruídos *backward*.

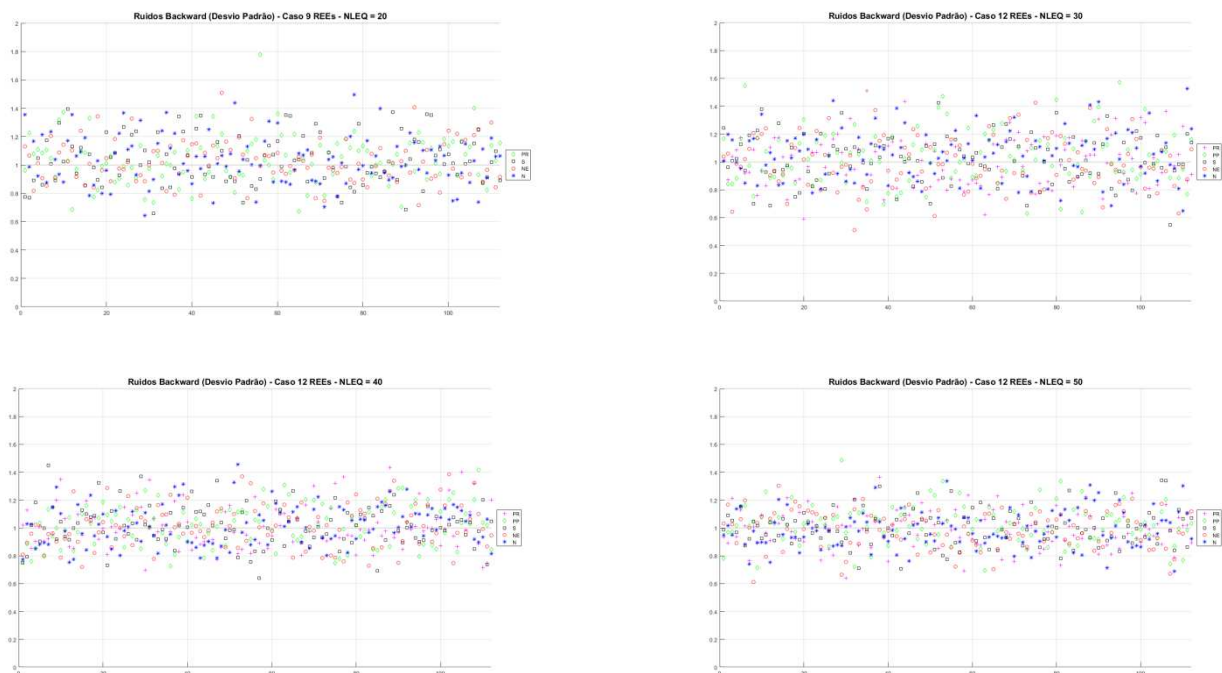


Figura 4.13 – Comparação dispersões dos desvios-padrão dos ruídos *backward*.

4.2 Análise da dispersão dos ruídos da simulação *forward*

4.2.1 Efeito do aumento no número de REEs

A Figura 4.14 a Figura 4.16 apresentam a dispersão da média e do desvio-padrão da amostra de NSIM=200 ruídos utilizados para a geração dos cenários *forward*, para cada REE, ao longo do horizonte de estudo, considerando configurações do SIN com 4, 9 e 12 REEs respectivamente. Do ponto de vista pragmático, a dispersão dos ruídos dos cenários *forward* mostrou-se pouco sensível ao aumento do número de REEs.

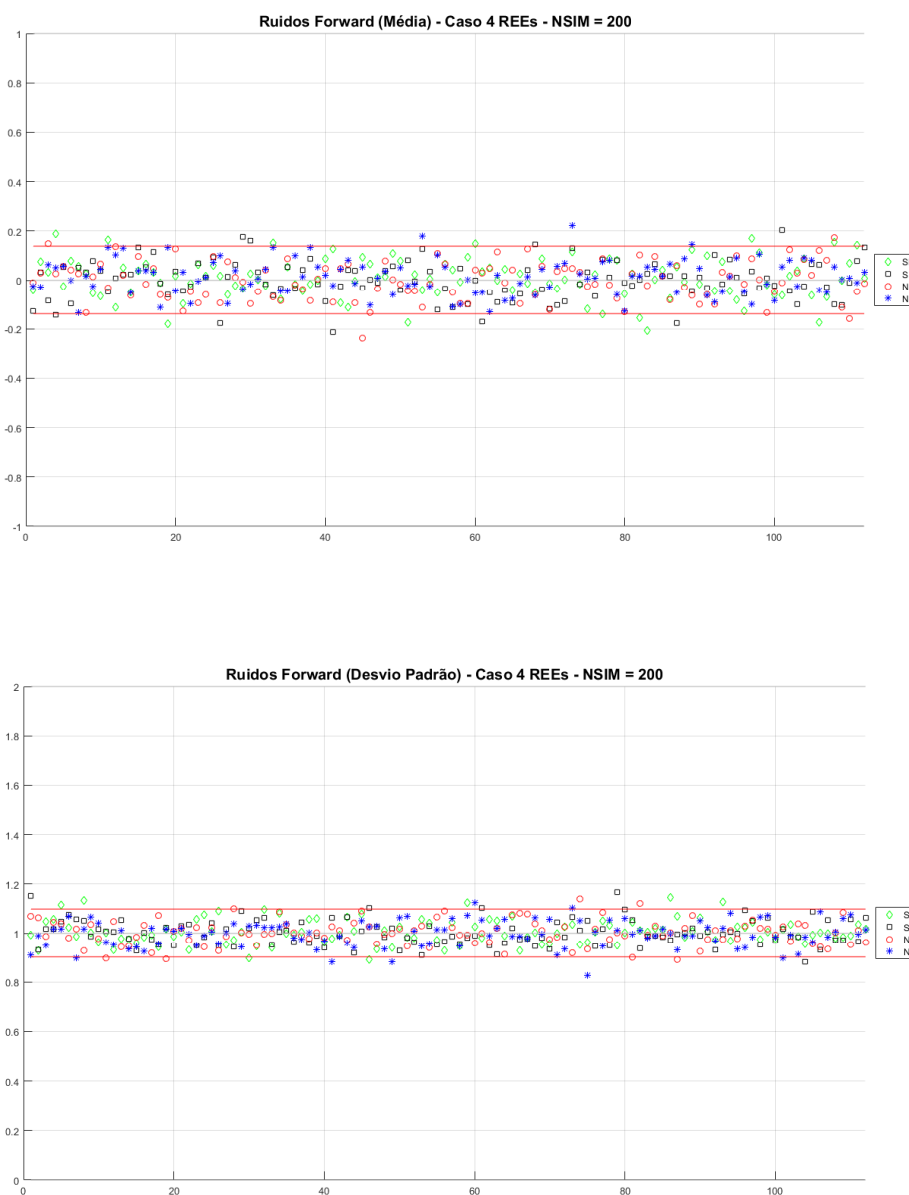


Figura 4.14 - Dispersão dos ruídos *forward*, para o caso com 4 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200).

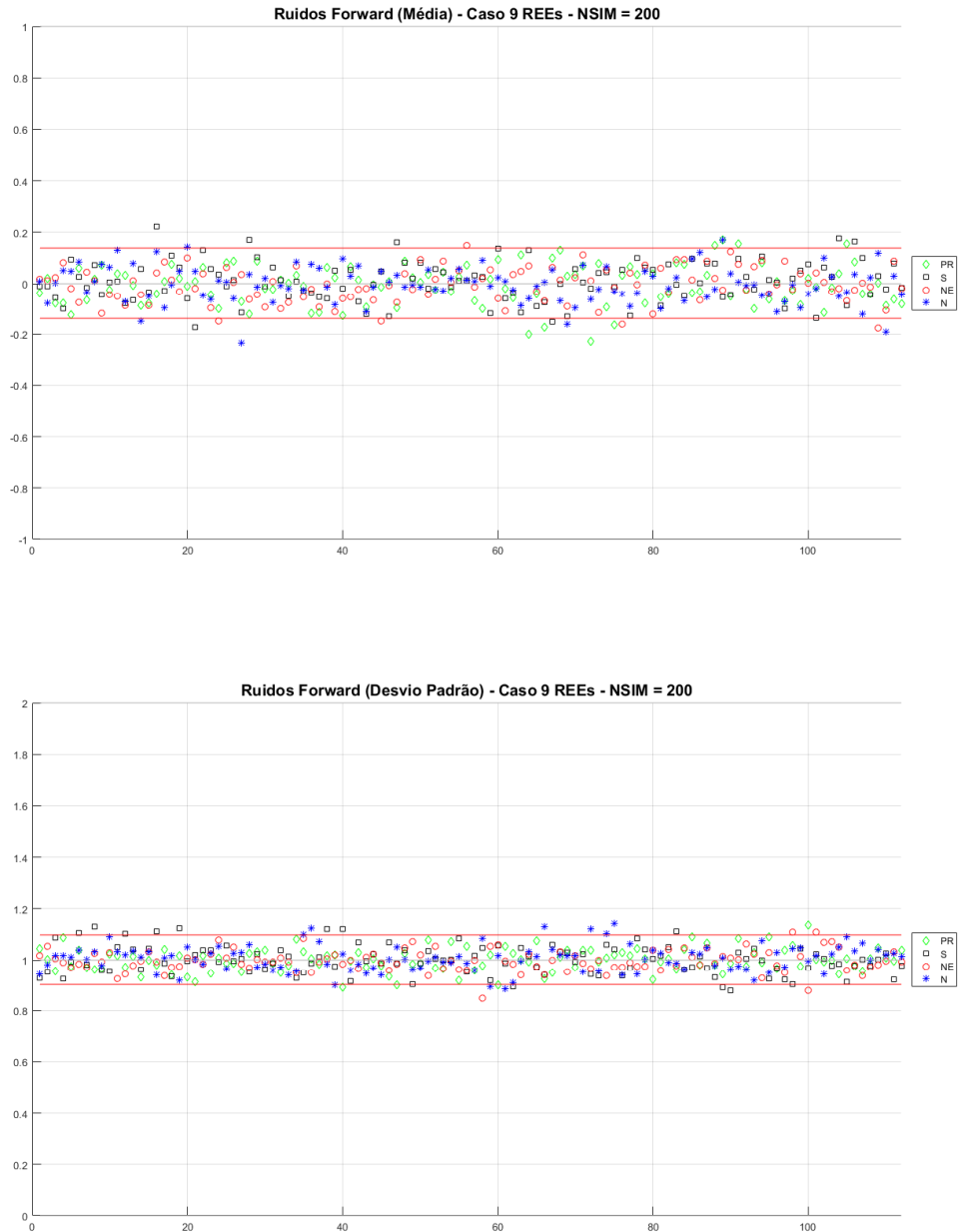


Figura 4.15 - Dispersão dos ruídos *forward*, para o caso com 9 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200).

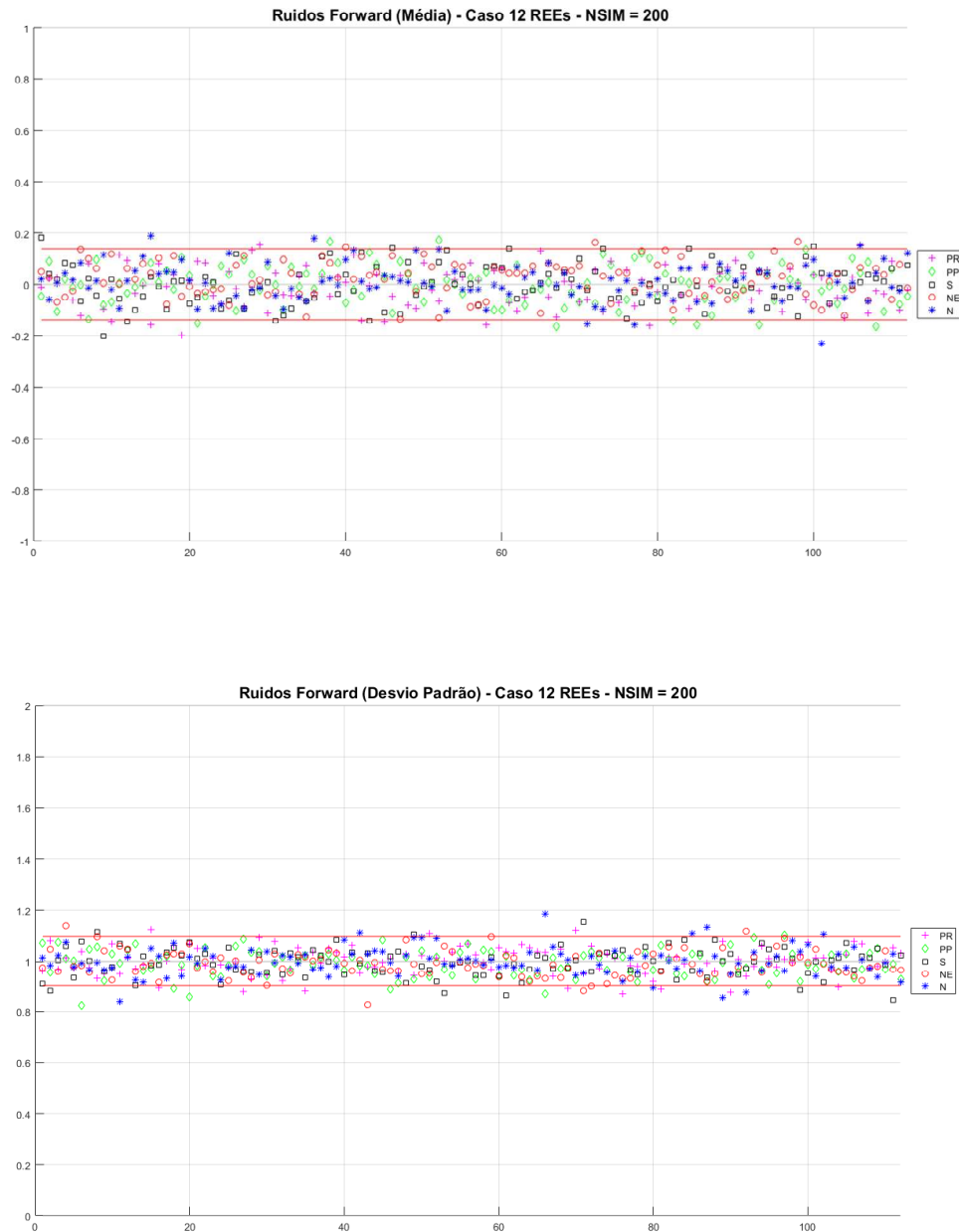
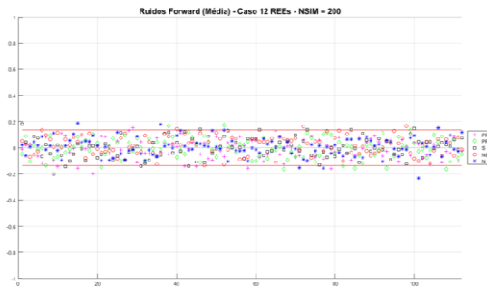
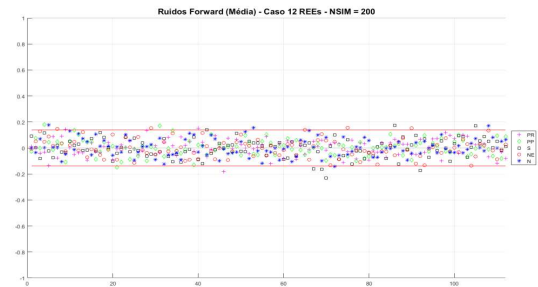


Figura 4.16 - Dispersão dos ruídos *forward*, para o caso com 12 REEs e os parâmetros atuais do modelo NEWAVE (NLEQ = 20, NSIM=200).

Adicionalmente, conforme pode ser observado na Figura 4.17, a dispersão das médias dos ruídos para o caso 12 REEs é semelhante àquela obtida com a aplicação da amostragem aleatória simples, para o caso com número de cenários igual a 200.



Amostragem Seletiva

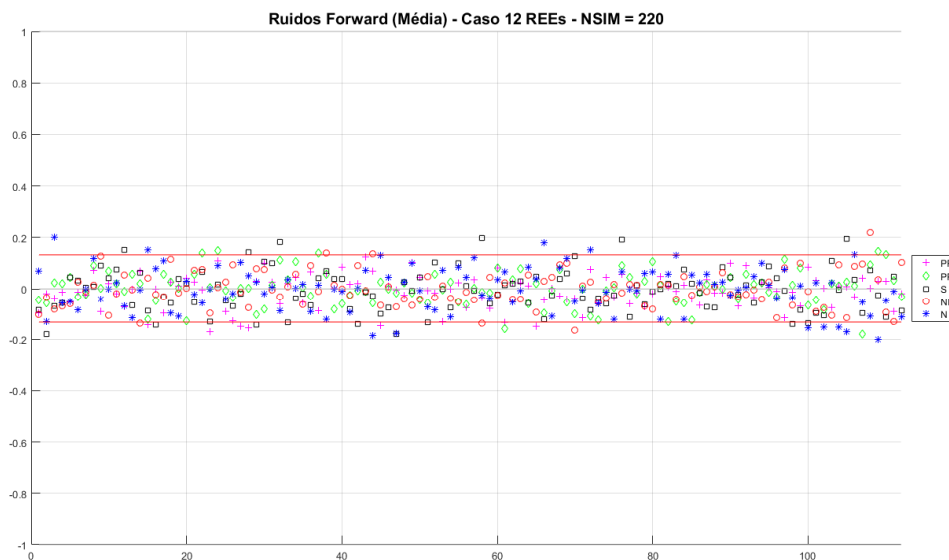


Amostragem Aleatória Simples

Figura 4.17 - Comparação entre as dispersões da média dos ruídos *forward* com uso das amostragens seletiva e aleatória simples.

4.2.2 Efeito do aumento no número de cenários da simulação *forward*

Nesta seção é apresentado o efeito do aumento da amostra de ruídos *forward* na variabilidade amostral da média e do desvio-padrão dos ruídos para os REEs ao longo do horizonte de estudo. Da Figura 4.18 a Figura 4.22, observa-se que a variabilidade amostral é pouco sensível ao aumento do número de cenários *forward*.



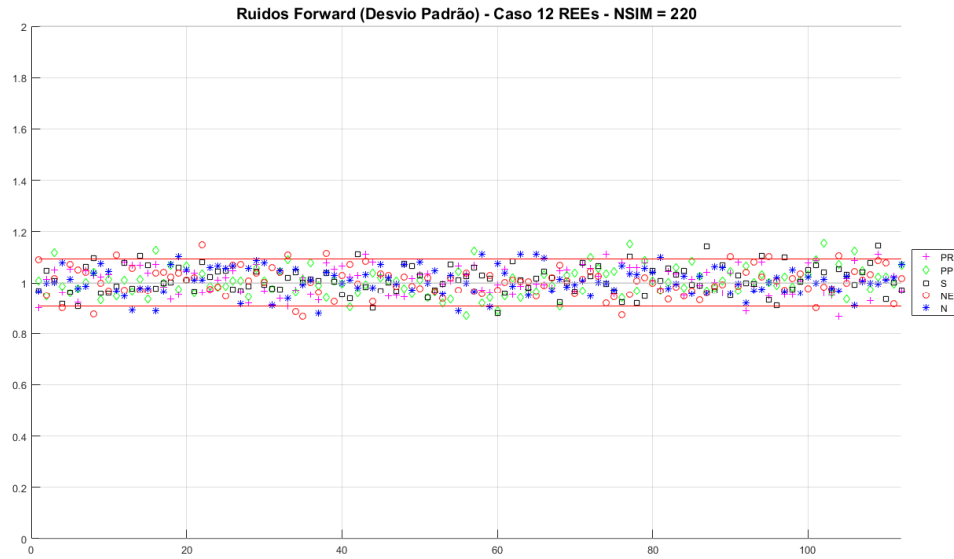
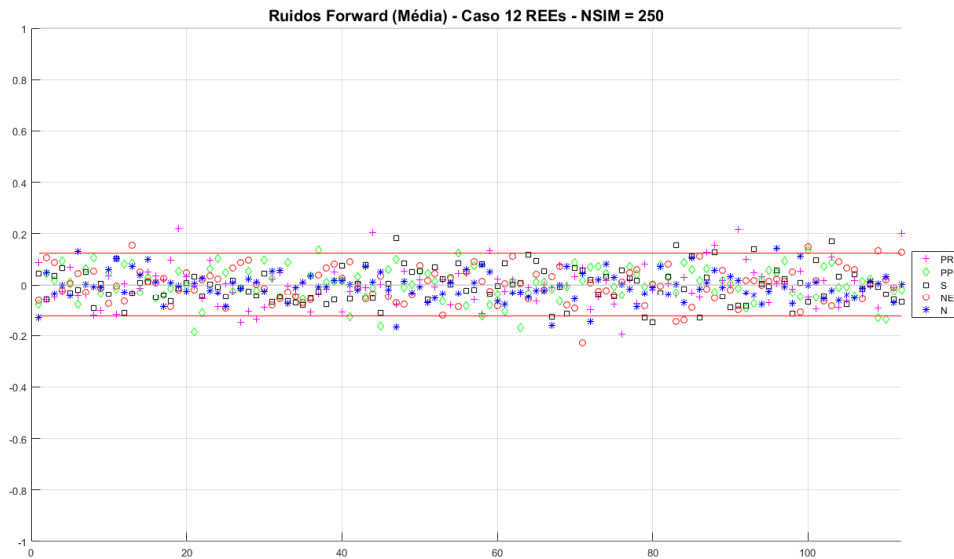


Figura 4.18 - Dispersões dos ruídos forward para o caso 12 REEs, com NSIM=220



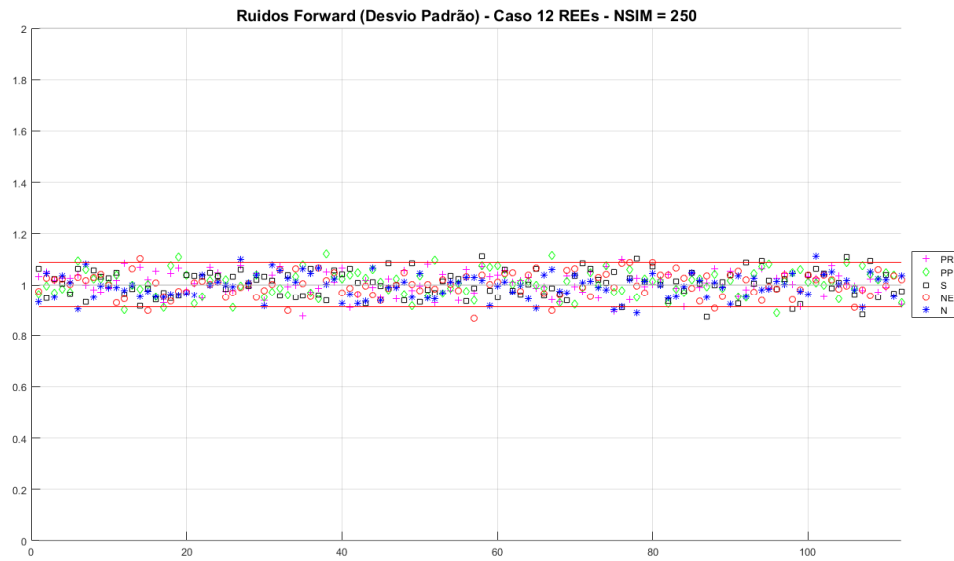
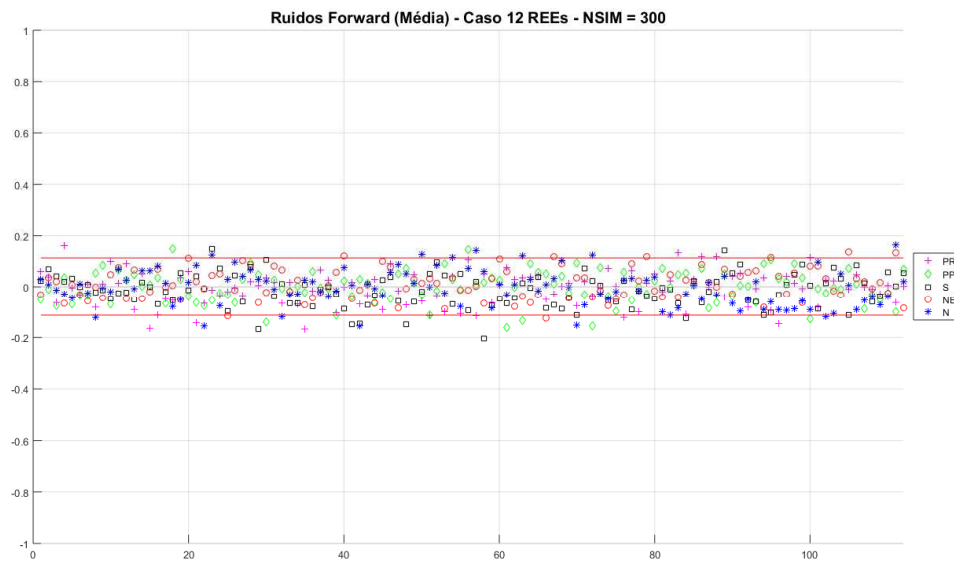


Figura 4.19 - Dispersões dos ruídos forward para o caso 12 REEs, com NSIM=250



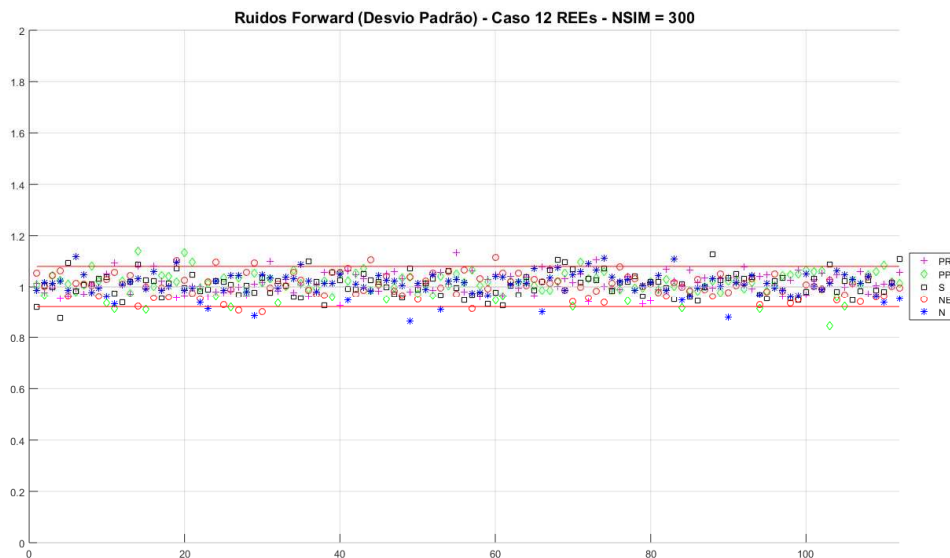


Figura 4.20 - Dispersões dos ruídos forward para o caso 12 REEs, com NSIM=300

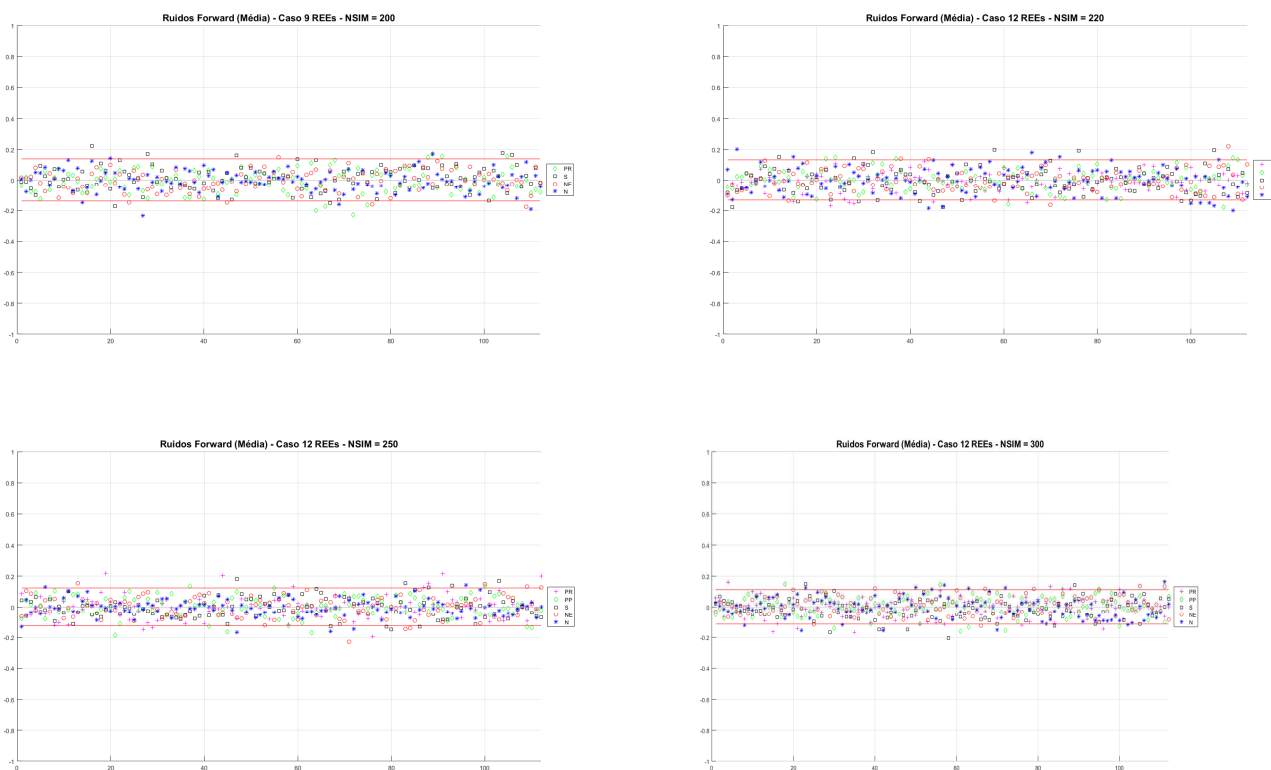


Figura 4.21 – Comparação dispersões das médias dos ruídos forward

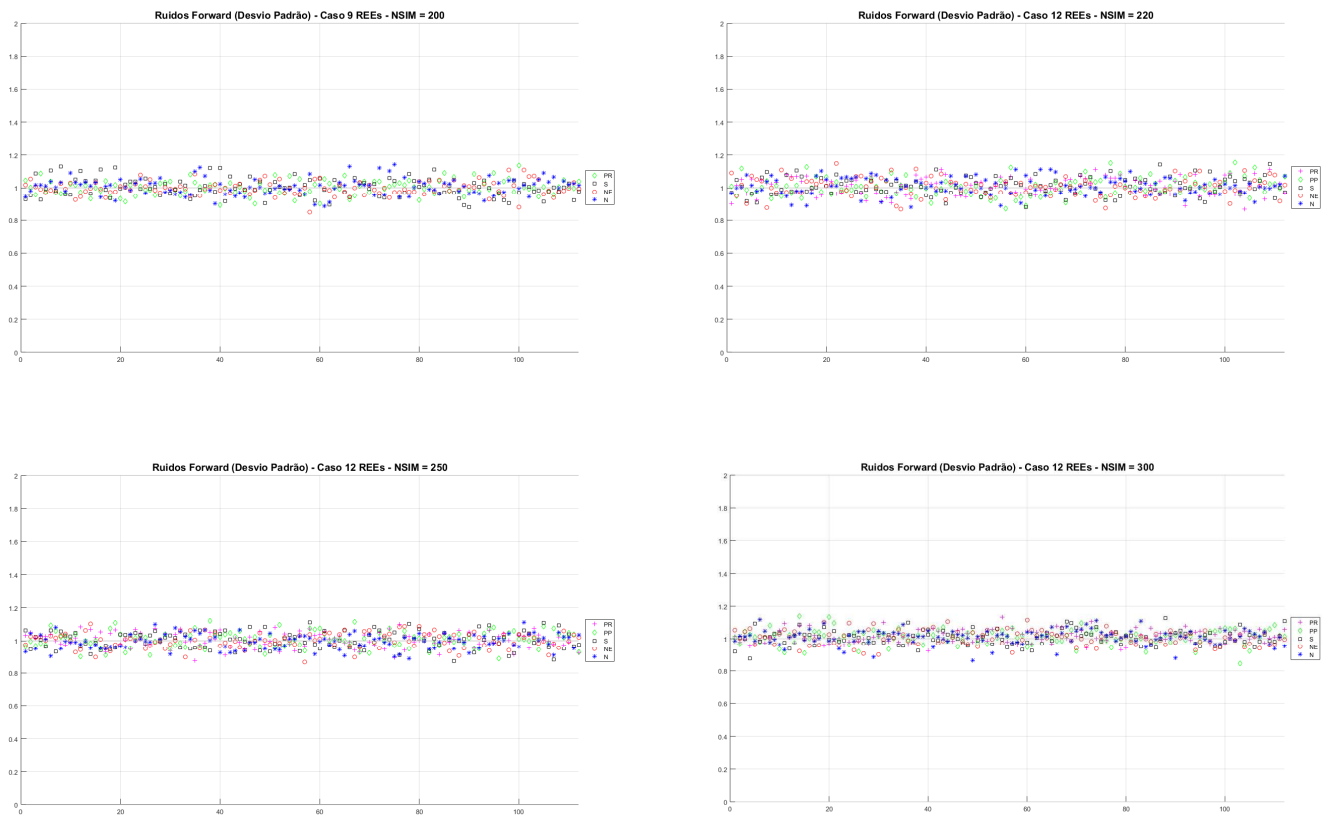


Figura 4.22 – Comparação dispersões dos desvios-padrão dos ruídos forward

4.3 Análise da distribuição de frequências acumuladas das energias naturais afluentes

Na seção 2.4 foi mostrado que no PMO de Setembro de 2017, as distribuições de frequências acumuladas das energias naturais afluentes utilizadas na recursão *backward* e na simulação *forward*, nas configurações com 9 e 12 REEs, apresentam boa aderência, com exceção dos meses de Janeiro e Fevereiro/2018. Nesta seção será avaliado o impacto no aumento dos parâmetros NLEQ e NSIM nas distribuições de frequência das ENAs desses meses com menor aderência.

4.3.1 Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM na distribuição de frequências acumuladas das ENAS da recursão *backward*

A Figura 4.23 apresenta uma análise de sensibilidade das distribuições de frequências acumuladas das ENAs da recursão *backward* nos mês de Janeiro/2018, para as configurações com 9 e 12 REEs, em função do número de aberturas (parâmetro NLEQ). Pode ser observado que à medida que se aumenta os valores de NLEQ recupera-se, já a partir de NLEQ=30, a aderência entre as distribuições de

frequência. Este resultado, em complemento à conclusão da seção 4.2, ressalta o efeito positivo do aumento do número de aberturas da recursão *backward*.

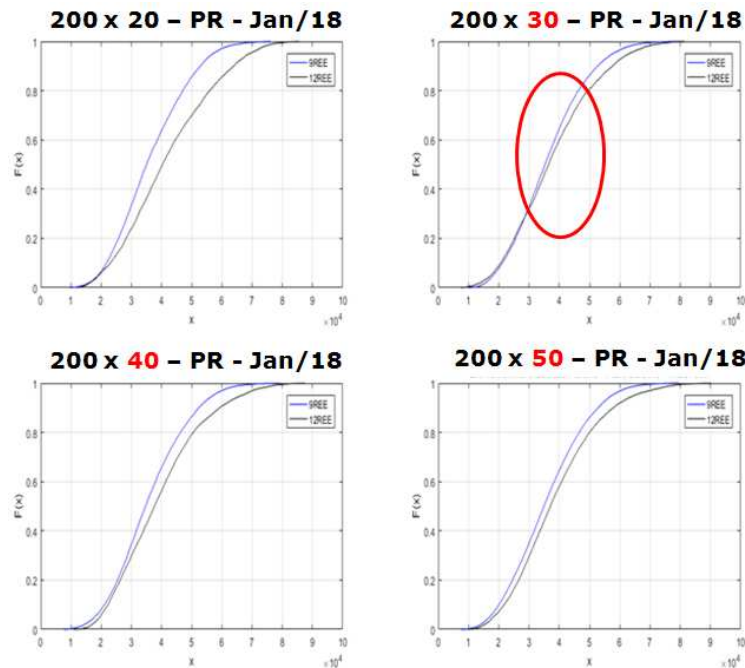


Figura 4.23 - Efeito do aumento de NLEQ na distribuição acumulada das ENAS *backward*, ao longo das series da PDDE.

De forma análoga, a Figura 4.24 apresenta uma análise de sensibilidade das distribuições de frequências acumuladas das ENAs da recursão *backward* nos mês de Janeiro/2018, para as configurações com 9 e 12 REEs, agora em função do número de simulações *forward* (parâmetro NSIM). Novamente, verifica-se que o aumento do número de cenários *forward* também pode contribuir para a melhoria da aderência entre as curvas analisadas.

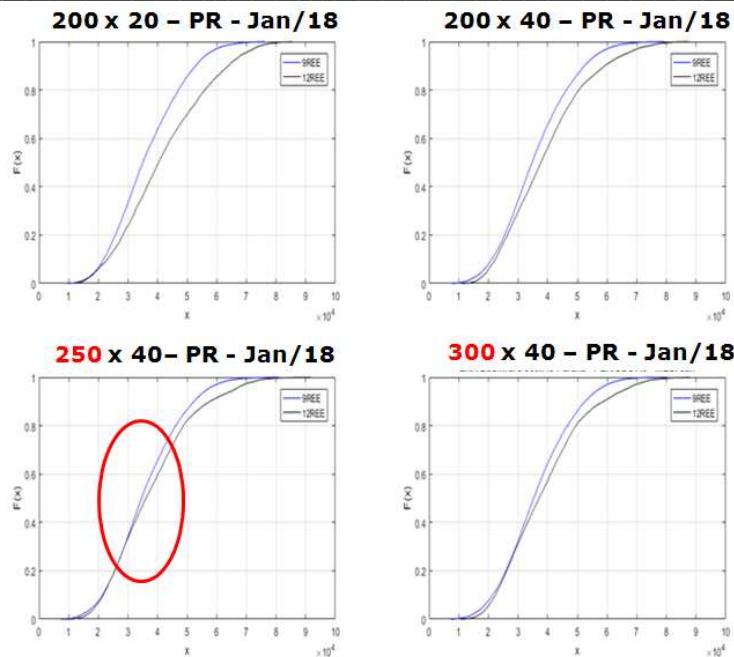


Figura 4.24 - Efeito do aumento de NSIM na distribuição acumulada das ENAS backward, ao longo das series da PDDE.

4.3.2 Efeito do parâmetro NSIM na distribuição de frequências acumuladas das ENAS da simulação forward

Dado que o parâmetro NLEQ não influencia na geração dos cenários forward, nesta seção será analisado somente o efeito do parâmetro NSIM.

A Figura 4.25 apresenta as distribuições de frequência acumulada das ENAS dos cenários forward no mês de Janeiro de 2018, para configuração de 9 e 12 REEs, utilizando os valores de 200, 250 e 300 para o parâmetro NSIM. Pode-se observar que, diferentemente da ENAs da recursão backward, já existe uma maior aderência entre ambas as configurações. Não obstante, o aumento do número de cenários forward aproxima ainda mais as referidas curvas, fixado um valor para o parâmetro NLEQ.

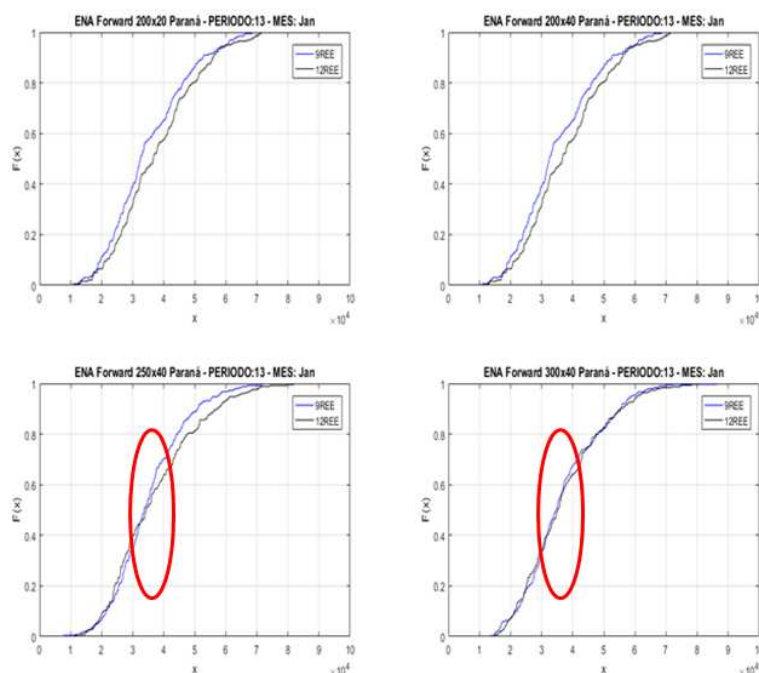


Figura 4.25 - Efeito do aumento de NSIM na distribuição acumulada das ENAS forward, ao longo das series da PDDE.

4.4 Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM no valor esperado dos CMOs

4.4.1 Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM na inflexão ocorrida na evolução temporal do valor esperado dos CMOs

Conforme descrito anteriormente, no PMO de Setembro de 2017 ocorreu uma redução relevante do custo total esperado de operação e do custo marginal de operação, ao passar de 9 para 12 REEs. Adicionalmente, conforme ilustrado na Figura 4.26(a), já apresentada na seção 2.4, a evolução da média dos custos marginais mensais de operação, ao longo do período de planejamento, também apresentou um declínio acentuado no quarto mês quando da simulação com 12 REEs. Nesta seção é analisado o efeito da variação dos parâmetros NLEQ e NSIM neste comportamento.

A Figura 4.26(b) até a Figura 4.26(d) apresentam a evolução da média do custo marginal de operação variando-se o parâmetro NSIM de 200, 220 e 250, mantendo-se o parâmetro NLEQ em 25, 30 e 40, respectivamente. Para valores do parâmetro NLEQ a partir de 25, o declínio acentuado da média do CMO no quarto mês deixa de existir. No entanto, apesar de ser mais impactante o aumento deste parâmetro, quando ele não é acompanhado de um aumento do parâmetro NSIM ainda se observa uma redução relevante da média do CMO nos primeiros três meses em relação aos valores da configuração com 9 REEs. Estes resultados indicam que uma melhor acurácia é obtida quando se incrementam simultaneamente ambos os parâmetros NLEQ e NSIM.

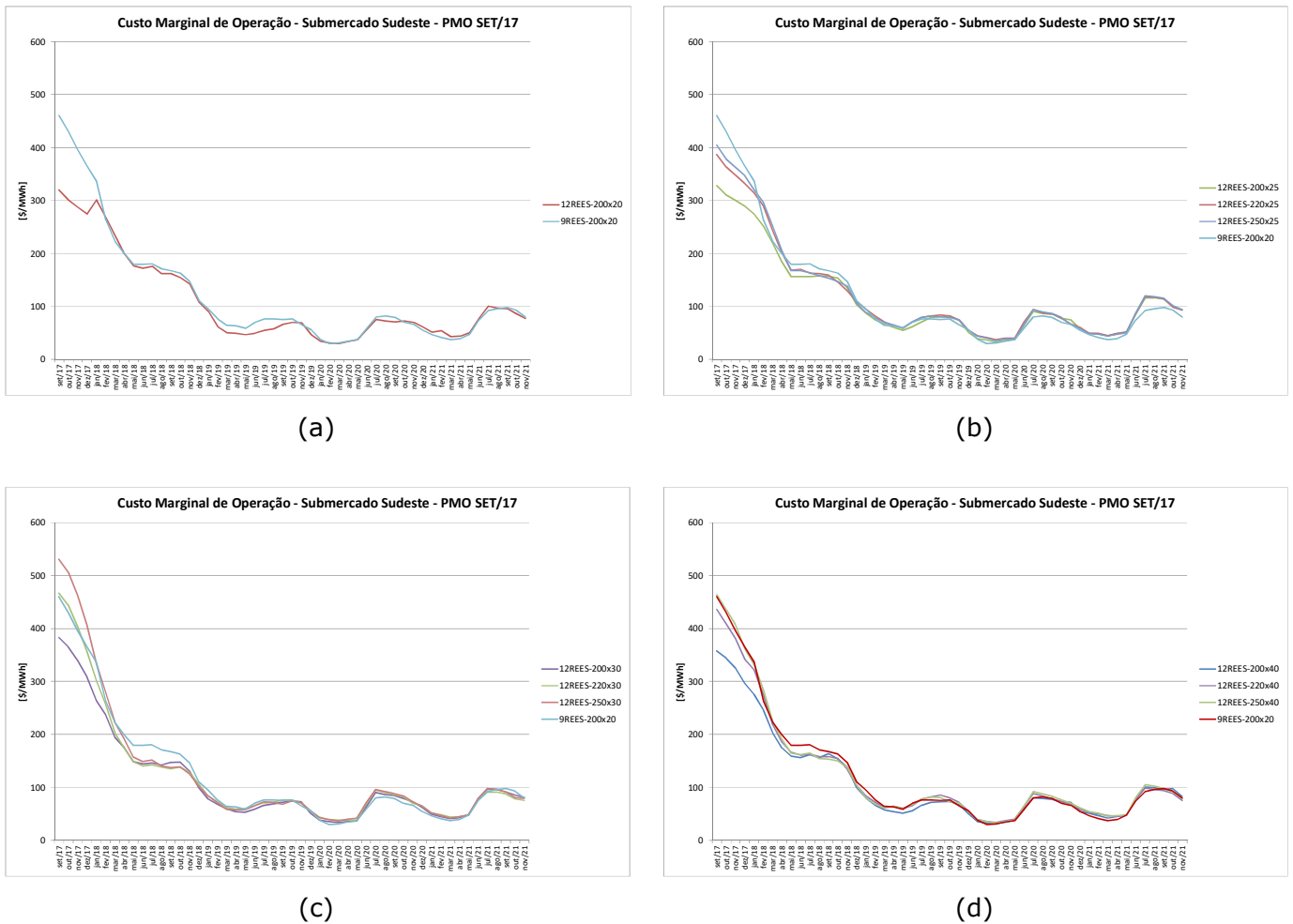


Figura 4.26 - Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM na inflexão ocorrida na evolução temporal do valor esperado dos CMOs.

4.4.2 Efeito dos parâmetros NLEQ e NSIM no valor esperado dos CMOs

A Figura 4.27 apresenta uma análise de sensibilidade da média do custo marginal de operação do primeiro ano do horizonte de planejamento, referente ao PMO de Setembro de 2017, em relação à variação dos parâmetros NLEQ e NSIM. Verifica-se que valores próximos aquele obtido para a configuração com 9 REEs (R\$413,20/MWh) são alcançados com o incremento simultâneo dos parâmetros NLEQ e NSIM.

Conclusão semelhante é obtida para outros PMOs, conforme ilustrado na Figura 4.28, assim como para a média dos CMOs do primeiro mês do horizonte de planejamento, vide Figura 4.29.

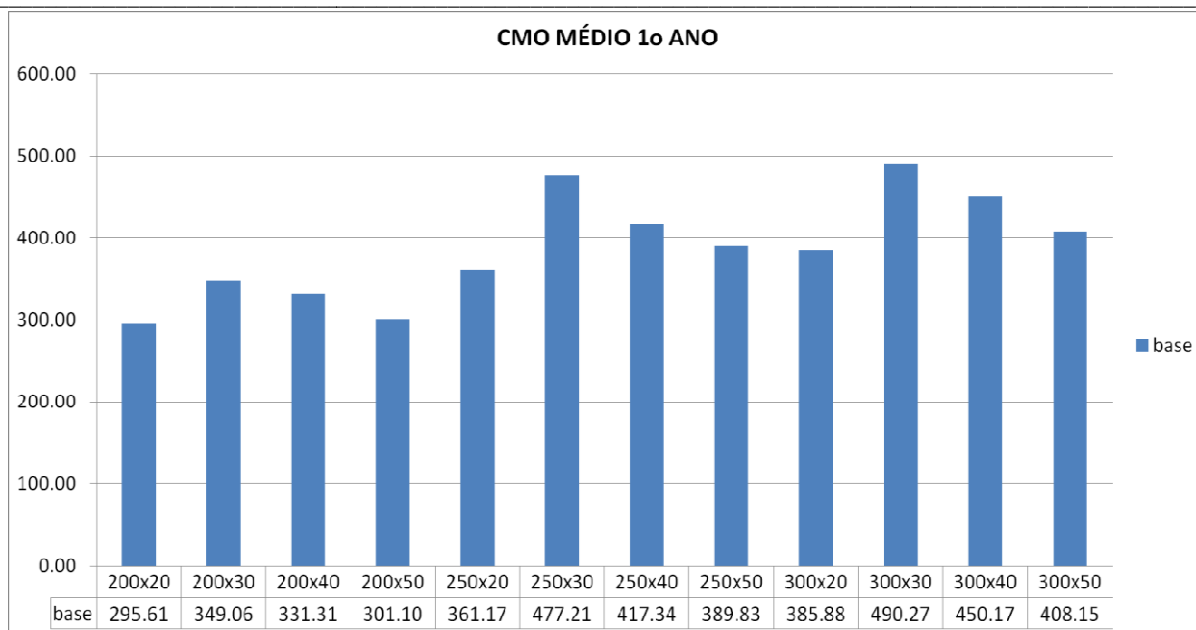


Figura 4.27 – CMOs médios do primeiro ano para diferentes combinações dos parâmetros NLEQ e NSIM na configuração de 12 REEs – PMO Set/2017.

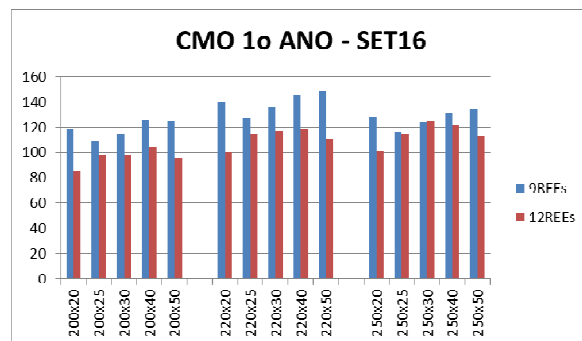
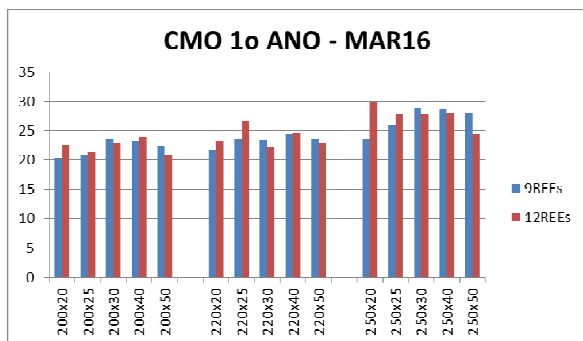


Figura 4.28 – CMOs médios do primeiro ano para diferentes combinações dos parâmetros NLEQ e NSIM na configuração de 12 REEs – PMOs Mar/2016 e Set /2016.

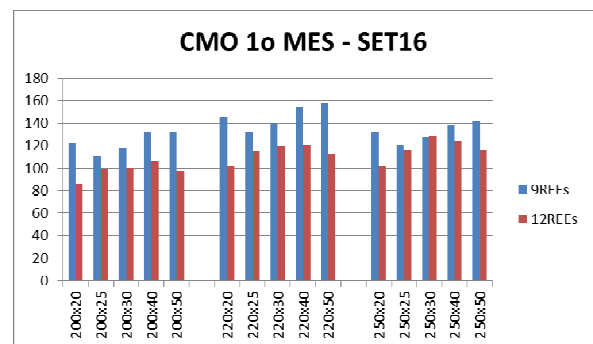
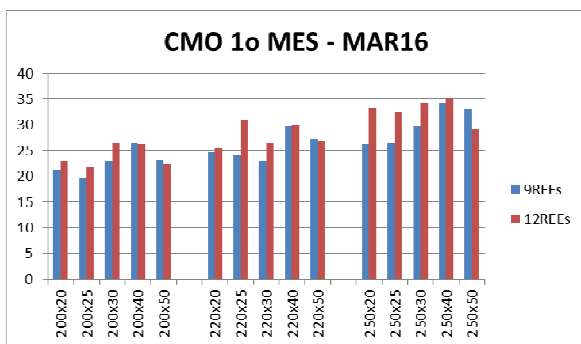
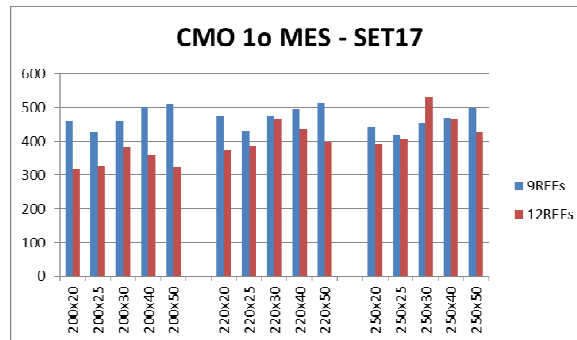


Figura 4.29 – CMOs médios do primeiro mês para diferentes combinações dos parâmetros NLEQ e NSIM na configuração de 12 REEs – PMOs Set/2017, Mar/2016 e Set /2016.

A Figura 4.30 apresenta o tempo médio por iteração em cada um dos casos de sensibilidade, referente ao PMO de Setembro de 2017, em relação à variação dos parâmetros NLEQ e NSIM. Verifica-se que à medida que os valores de NSIM e NLEQ se elevam os tempos por iteração também se elevam podendo até dobrar de valor. Já quando se analisa o número de iterações do algoritmo de programação dinâmica dual estocástica não se identifica uma tendência, seja de crescimento ou de diminuição, conforme ilustrado na Figura 4.31.

Na Figura 4.32 estão relacionados para as configurações com 9 e 12 REEs, o tempo por iteração da PDDE e incluindo outros PMOs, em cada um dos casos de sensibilidade. Novamente, verifica-se que à medida que os valores de NSIM e NLEQ se elevam, os tempos por iteração também aumentam, podendo até dobrar de valor.

Já a Figura 4.33 apresenta o tempo total de processamento. Observa-se que existem várias combinações dos valores dos parâmetros os valores de NLEQ e NSIM que resultam em um aumento de acurácia com incremento razoável de tempo de processamento. Assim, a escolha dos parâmetros NLEQ e NSIM devem resultar de uma solução de compromisso entre qualidade de solução e custo computacional.

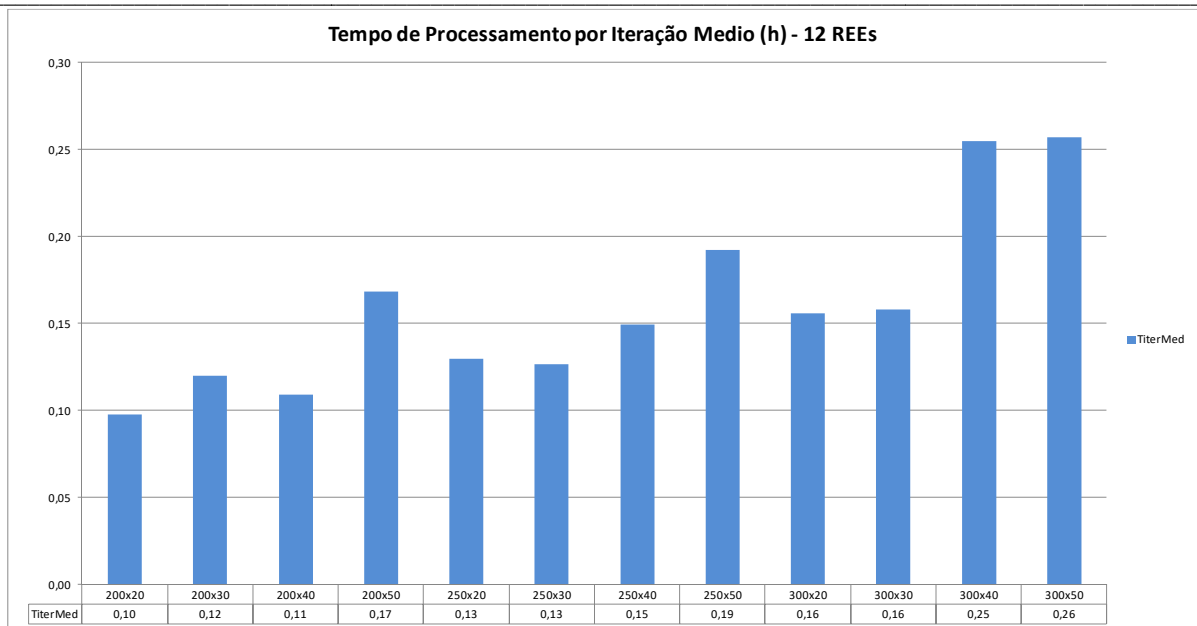


Figura 4.30 – Tempo de processamento por iteração da PDDE para diferentes combinações dos parâmetros NLEQ e NSIM na configuração de 12 REEs – PMO Set/2017.

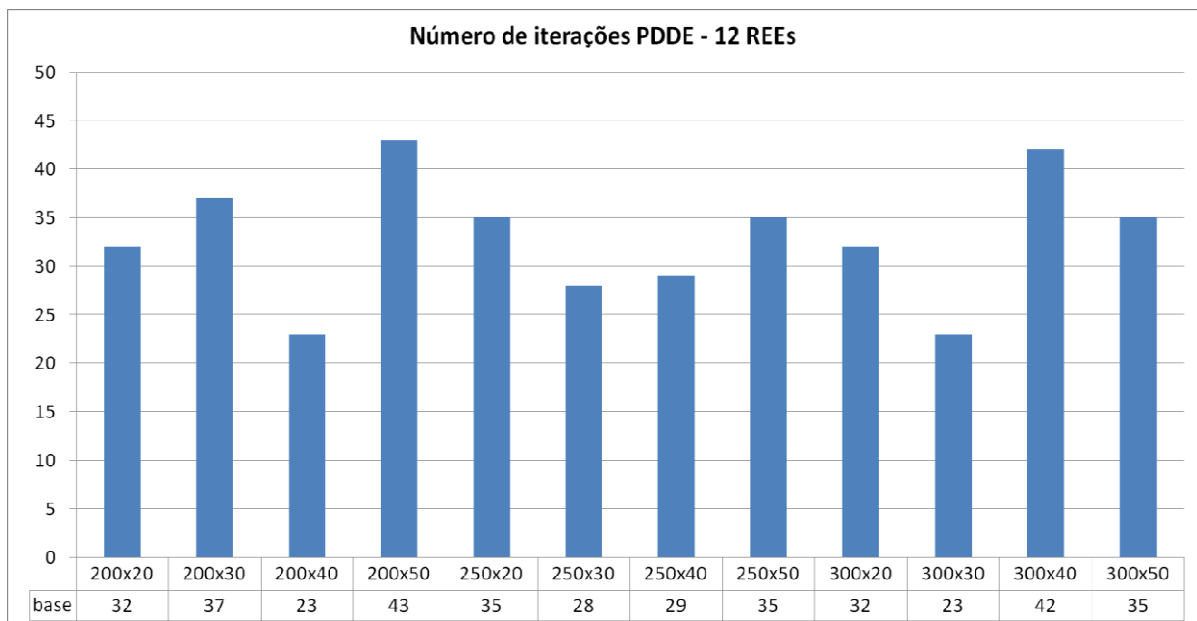


Figura 4.31 – Número de iterações da PDDE para diferentes combinações dos parâmetros NLEQ e NSIM na configuração de 12 REEs – PMO Set/2017.

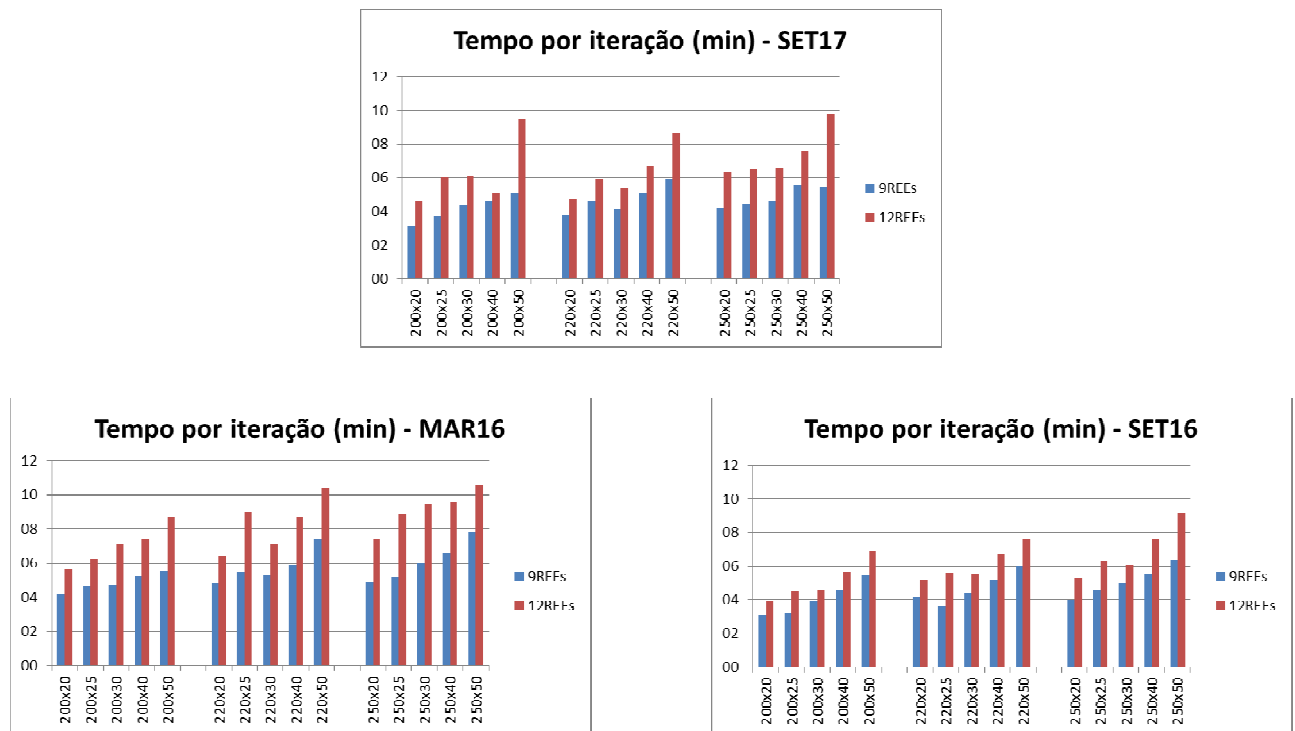


Figura 4.32 – Tempo de processamento por iteração da PDDE para diferentes combinações dos parâmetros NLEQ e NSIM na configuração de 12 REEs – PMOs Set/2017, Mar/2016 e Set /2016.

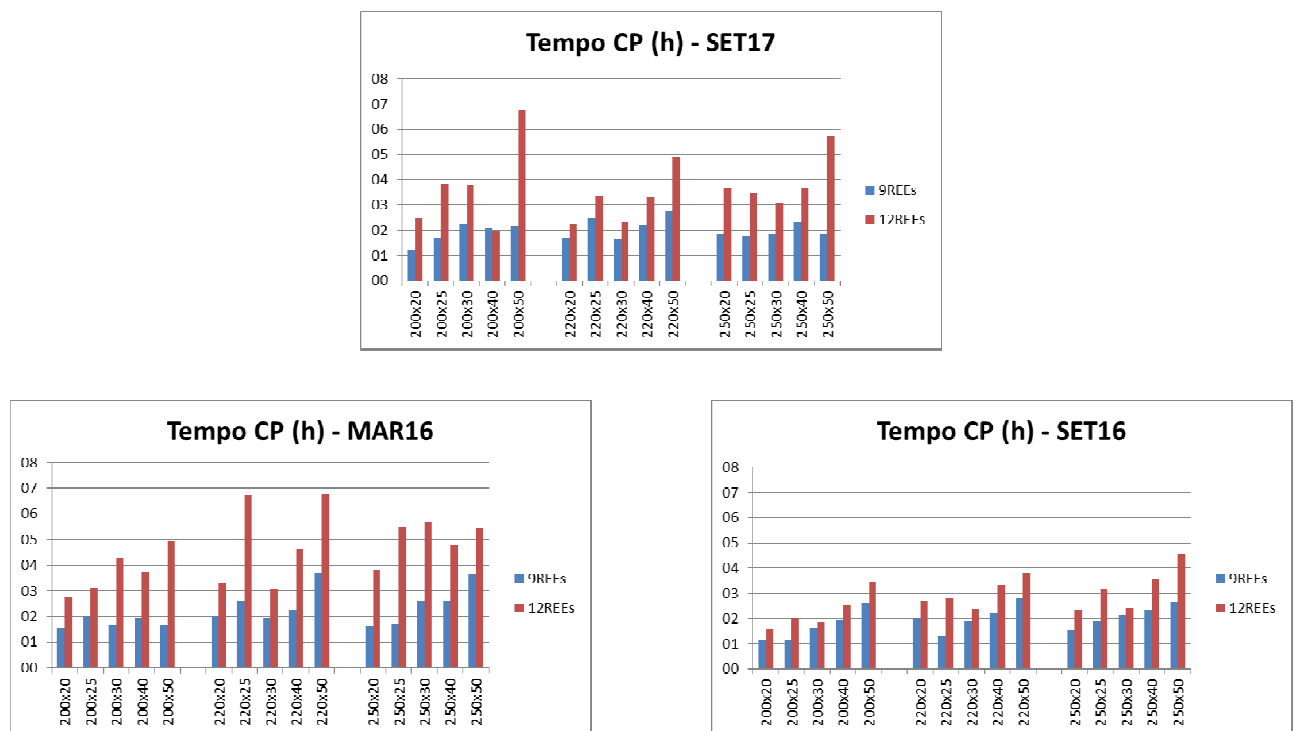


Figura 4.33 – Tempo total de processamento para diferentes combinações dos parâmetros NLEQ e NSIM na configuração de 12 REEs – PMOs Set/2017, Mar/2016 e Set/2016.

5 Conclusões

Durante o ano de 2015 o Grupo de Trabalho “Questões Metodológicas Associadas aos Modelos Computacionais para a Expansão e Operação do Setor Elétrico Brasileiro” da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico - GT7/CPAMP, avaliou a representação do SIN com um número maior de REEs [12]. Naquela ocasião foram estudadas configurações considerando de 6 a 12 REEs, e indicou-se o uso posterior de 12 REEs. Em junho de 2017, a CPAMP determinou a adoção da configuração com 12 REEs a partir de Janeiro/2018.

No PMO de Setembro de 2017, verificou-se uma redução expressiva do custo total de operação e do custo marginal de operação, quando se altera a configuração de 9 para 12 REEs. Tais reduções também foram observadas nos PMOs de Outubro e Novembro de 2017.

Este relatório teve por objetivo fazer uma análise comparativa do comportamento do modelo NEWAVE entre os casos com 9 e 12 REEs, com foco na identificação das causas da redução do custo marginal de operação na configuração com maior número de REEs.

Ressalta-se, primeiramente, que as análises exaustivas conduzidas pelo CEPEL não identificaram erro de implementação no modelo NEWAVE.

Dois fatores iniciais contribuíram para a redução do CMO/PLD nos casos com 12 REEs:

- 1) Melhor representação da diversidade hidrológica, capturando a complementaridade/sazonalidade entre os REEs Paraná (PR) e Paranapanema (PP);
- 2) Aumento da geração não armazenável, devido à baixa capacidade de armazenamento do REE Paranapanema (PP);

Esta redução foi “amplificada” (terceiro fator) pela questão da variação amostral, intrínseca à utilização de técnicas de amostragem para modelar um processo estocástico, neste caso, a árvore de cenários de vazões afluentes às usinas hidroelétricas. Adicionalmente, a variação amostral representada pela dispersão dos ruídos aumenta, ainda que de forma controlada, à medida que cresce o número de REEs, pois se manteve o mesmo tamanho da amostra para representar árvores de cenários com dimensões mais elevadas.

No modelo NEWAVE, o problema de planejamento da operação de longo e médio prazo é resolvido pelo algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica, onde a árvore de cenários é representada pelos cenários da recursão *backward* e a função de custo futuro é construída nos estados fornecidos

pela simulação *forward*. A cada período do horizonte de estudo são considerados NLEQ cenários *backward* e NSIM cenários *forward*, atualmente iguais a 20 e 200, respectivamente.

Como proposta para mitigar o efeito da variação amostral, que é intrínseca à modelagem de um processo estocástico, e com base nos resultados apresentados ao longo deste relatório, sugerem-se os seguintes procedimentos:

- Ajuste em parâmetros do modelo:
 - ✓ Aumento do número de cenários *backward* (parâmetro NLEQ), visando o aprimoramento na representação do processo estocástico;
 - ✓ Aumento do número de séries *forward* (parâmetro NSIM), redundando na melhoria do espaço de busca para construção da FCF.
- Melhoria do espaço de busca para construção da Função de Custo Futuro, por meio de:
 - ✓ Emprego de técnicas de reamostragem;
 - ✓ Combinação do uso de séries condicionadas com não condicionadas, e níveis de armazenamento em que se queira proteger.

O primeiro conjunto - aumento dos parâmetros NLEQ e NSIM do modelo NEWAVE, é mais imediato e deve buscar uma relação adequada entre precisão e esforço computacional. Já o segundo conjunto não é imediato, pois envolve estudos mais aprofundados para aprimoramento no modelo.

6 Referências

- [1] CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Manual do Usuário do modelo NEWAVE, Dezembro de 2016.
- [2] 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.
- [3] 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", 16th PSCC – Power Systems Computation conference, Glasgow, 2008.
- [4] D. D. J. Penna, M. E. P. Maceira, J.M. Damázio, "Selective sampling applied to long-term hydrothermal generation planning", 17th PSCC - Power Systems Computation Conference, Stockholm, Sweden, Ago. 2011.
- [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, pp. 305-310, Vancouver, Canada, Set. 1997.
- [6] M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto, "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning", Mathematical Programming, v. 52, n.1-3, pp. 359-375, Maio 1991
- [7] 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.
- [8] A. B. Philpott, V. L. de Matos, "Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion", European Journal of Operational research, v. 218, n.2, pp. 470-483, 2012
- [9] A. L. Diniz, M. P. Tcheou, M. E. P. Maceira, "Uma abordagem direta para consideração do CVAR no problema de planejamento da operação hidrotérmica" XII SEPOPE - Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Maio de 2012.
- [10] A. Shapiro, W. Tekaya, J.P. Costa, M.P. Soares, "Risk neutral and risk averse Stochastic Dual Dynamic Programming method", European journal of operational research, v. 224, n.2, pp. 0375-0391, Jan. 2013
- [11] M.E.P. Maceira, L.G.B. Marzano, D.D.J. Penna, A.L. Diniz, T.C. Justino, "Application of CVaR risk aversion approach in the expansion and operation planning and for setting the spot price in the Brazilian hydrothermal interconnected system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v.72, pp. 126-135. Nov. 2015.
- [12] Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico – CPAMP, "Avaliação da Representação do SIN em Reservatórios Equivalentes de Energia - REE", Relatório Técnico do Grupo de Trabalho Questões Metodológicas Associadas aos Modelos Computacionais de Expansão e Operação – GT7, Setembro de 2015.

[13] A. L. Diniz, M.E.P. Maceira, R.J. Pinto, C.L.V. Vasconcellos, D.D.J. Penna, C.B. Cruz, Estratégia de Seleção de Cortes de Benders para Redução do Tempo Computacional da Programação Dinâmica Dual Estocástica – Aplicação ao Modelo NEWAVE, Relatório Técnico CEPEL nº 11138/2017, Junho de 2017.

[14] Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico – CPAMP, Ata de Reunião Plenária “Validação da nova versão do modelo NEWAVE com representação de REEs e definição da configuração de REEs a ser adotada”, 14 de Setembro de 2015.