

# Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico

---

## GT Metodologia

Análise de alternativas para mitigação da  
volatilidade do CMO/PLD

## Sumário

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1) Apresentação .....                                                                                           | 3  |
| 2) Introdução .....                                                                                             | 4  |
| 3) Estudos passados e frentes de investigação .....                                                             | 9  |
| 4) Metodologia .....                                                                                            | 18 |
| 4.1) Ordem do PAR(p) .....                                                                                      | 18 |
| 4.1.1) Não redução da ordem do PAR(p) .....                                                                     | 22 |
| 4.1.2) Critérios de informação para seleção da ordem de modelos matemáticos ...                                 | 24 |
| 4.2) Correlação espacial mensal .....                                                                           | 26 |
| 4.3) Centróide + reamostragem dos cenários <i>forward</i> .....                                                 | 29 |
| 5) Resultados .....                                                                                             | 31 |
| 5.1) Não redução da ordem do PAR(p) .....                                                                       | 31 |
| 5.2) Correlação espacial mensal .....                                                                           | 33 |
| 5.3) Centróide + reamostragem dos cenários de afluências da <i>forward</i> .....                                | 35 |
| 5.4) Centróide + reamostragem dos cenários de afluência da <i>forward</i> + correlação<br>espacial mensal ..... | 37 |
| 6) Conclusões e recomendações .....                                                                             | 51 |
| 7) Referências .....                                                                                            | 53 |
| Anexo .....                                                                                                     | 54 |

## 1) Apresentação

Este relatório está inserido no contexto do Grupo de Trabalho de Metodologia da CPAMP – Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico, criada pela Resolução CNPE nº 1, de 2007 e regulamentada pela Portaria MME nº 47, de Fevereiro de 2008, com a finalidade de garantir coerência e integração das metodologias e programas computacionais utilizados pelo MME, EPE, ONS e CCEE.

O Grupo de Metodologia da CPAMP é coordenado pela EPE (representada pela Assessoria da Presidência e Superintendência de Planejamento da Geração – SGE) e conta com a participação do MME (representado pelas Secretarias de Energia Elétrica – SEE, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – SPE e Assessoria Econômica - Assec), da ANEEL (representada pela Superintendência de Regulação da Geração – SRG), do ONS (representado pelas Gerências de Planejamento Energético - PE e de Programação - PR) e da CCEE (representada pela Gerência Executiva de Preços - GEPRE). O grupo contou com a assessoria técnica do CEPEL (representado pelo Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente).

Os estudos referentes ao tema da volatilidade do CMO/PLD iniciaram-se em julho de 2017, motivados pelos eventos de volatilidade observados em maio e junho daquele ano. O Subgrupo de Trabalho de Volatilidade do CMO/PLD, subordinado ao GT Metodologia, foi criado na reunião plenária da CPAMP realizada em 14 de junho de 2017. Análises mais extensivas após implementações computacionais nos modelos foram realizadas ao longo do segundo semestre de 2018 e primeiro trimestre de 2019,

## 2) Introdução

A característica hidrotérmica do Sistema Interligado Nacional (SIN) confere à sua operação uma componente de incerteza associada à geração de cenários/previsão do comportamento hidrológico futuro, tendo, muitas vezes, o valor marginal da água como o fator determinante para a trajetória do Custo Marginal de Operação (CMO) e do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).

Por conta da correlação temporal presente no processo hidrológico, as estimativas de afluições futuras de uma hidrelétrica ou reservatório equivalente (REE) dependem de variações das próprias afluições de períodos anteriores e, além disso, são influenciadas pelas afluições das outras hidrelétricas/REEs. Destaca-se que a mudança na disponibilidade dos recursos, seja o total no SIN ou alterando sua alocação entre as hidrelétricas/REEs, pode mudar a solução do problema de otimização, inclusive afetar o armazenamento presente e suas estimativas futuras.

A geração de cenários futuros de afluição pelos modelos computacionais usados no setor elétrico, com forte componente estocástico, são dependentes da variável de estado “tendência hidrológica” (expressa pelas vazões do passado recente), conjugada com a progressiva redução da capacidade de regularização dos reservatórios, em função da crescente presença de usinas hidrelétricas a fio d’água, a tendência hidrológica tem afetado de maneira cada vez mais significativa a valoração presente e futura da água. Tais valorações se refletem, portanto, no CMO/PLD, o qual tem se tornado cada vez mais sensível tanto a mudanças na tendência hidrológica quanto a desvios entre as vazões previstas e verificadas. Conforme mostrado na Figura 1, a atualização de dados que exerce maior influência no comportamento do CMO/PLD está associada a representação do comportamento hidrológico.

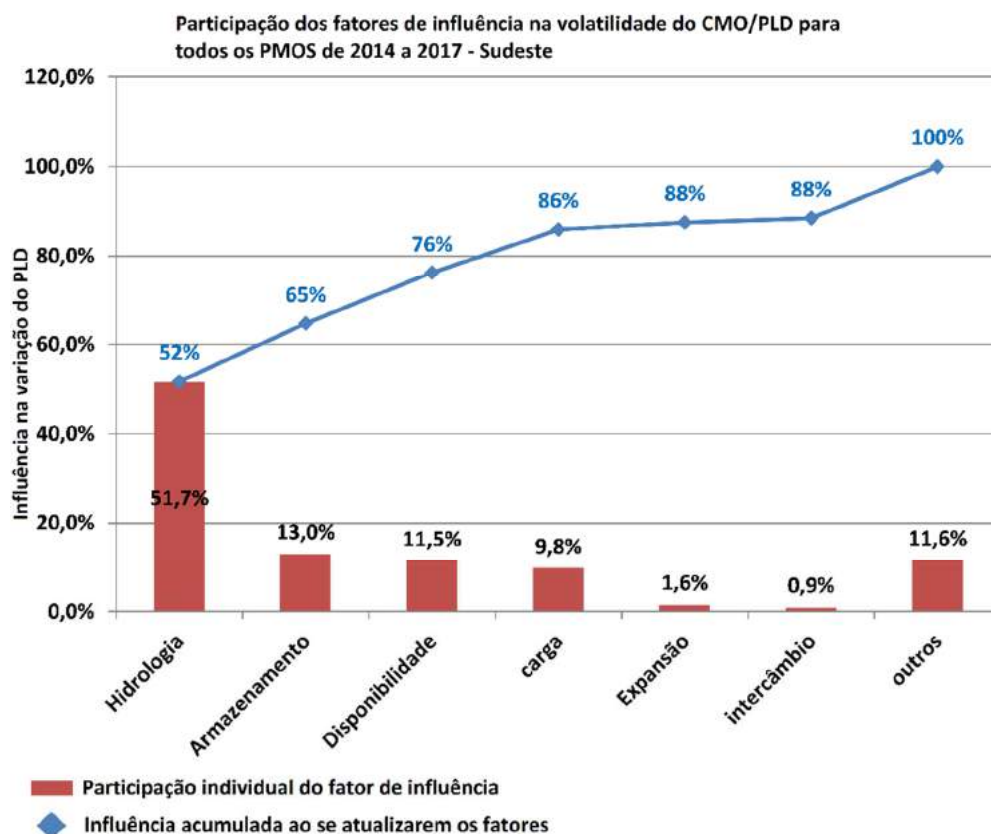


Figura 1 – Participação dos fatores de influência na volatilidade do CMO/PLD.

Na Figura 2 são mostrados os modelos hidrológicos atualmente usados no setor elétrico:

- os modelos chuva-vazão são determinísticos e dão as previsões diárias de afluências, bem como da maior parte da primeira semana do horizonte.
- o modelo PREVIVAZ (1) é um modelo estocástico e seu objetivo é fornecer a previsão de vazão para as próximas semanas, utilizado no modelo DECOMP (2). Os modelos chuva-vazão e o modelo PREVIVAZ são modelos univariados, portanto devem ser executados para cada usina hidrelétrica pertencente à configuração.
- por sua vez, o modelo autorregressivo GEVAZP (3) é um modelo estocástico e multivariado, utilizado no DECOMP (segundo mês) e NEWAVE (4) (todo o horizonte). O modelo GEVAZP representa a incerteza do processo estocástico de afluências de médio e longo prazo para gerar diversos cenários futuros.

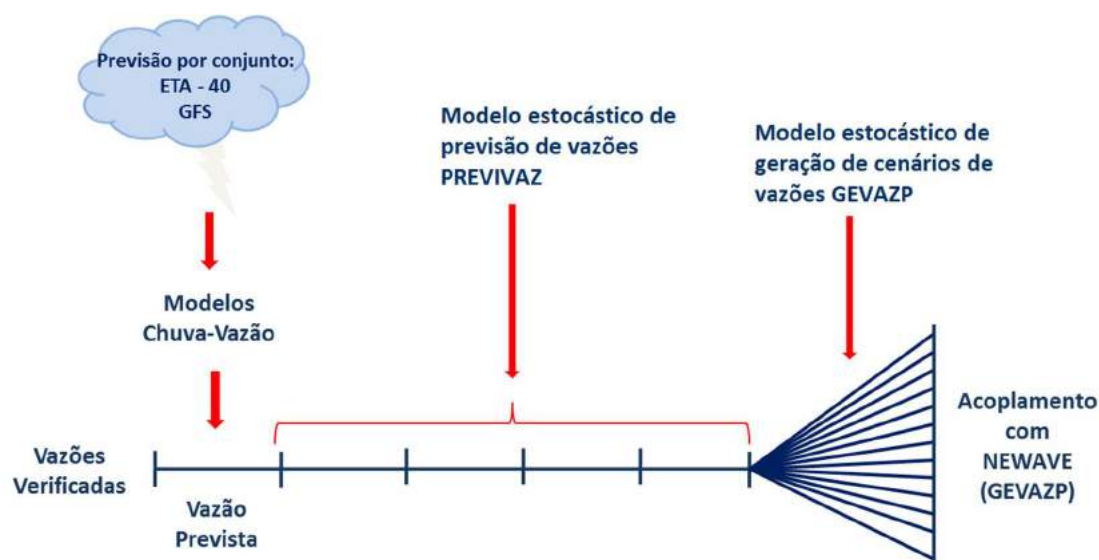


Figura 2 – Cadeia de modelos de previsão e geração de cenários hidrológicos do setor elétrico.

A Figura 3 ilustra a média semanal dos valores oficiais de PLD registrados entre 2017 e 2019: nos submercados Sudeste/Centro-Oeste e Sul, é possível caracterizar três grandes eventos de volatilidade: nos trimestres maio-junho-julho/2017 e março-abril-maio/2018, quando o preço apresentou queda abrupta durante o período seco, voltando a se elevar em seguida, e no trimestre janeiro-fevereiro-março/2019, quando o comportamento foi o oposto: o preço se elevou abruptamente durante o período úmido, reduzindo na sequência.

Na Figura 4 são mostrados os mesmos preços, porém sem limitação de valores mínimo e máximo, conforme saídas do DECOMP. Nota-se que as flutuações são ainda mais acentuadas.

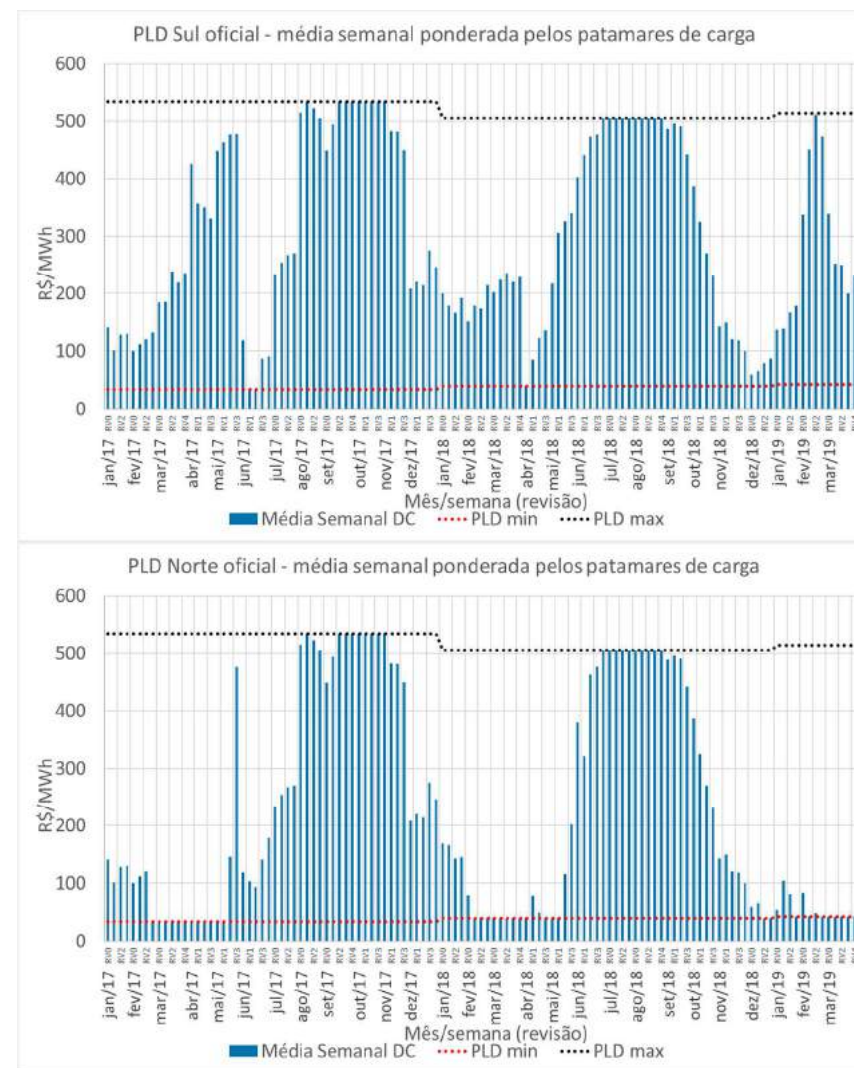
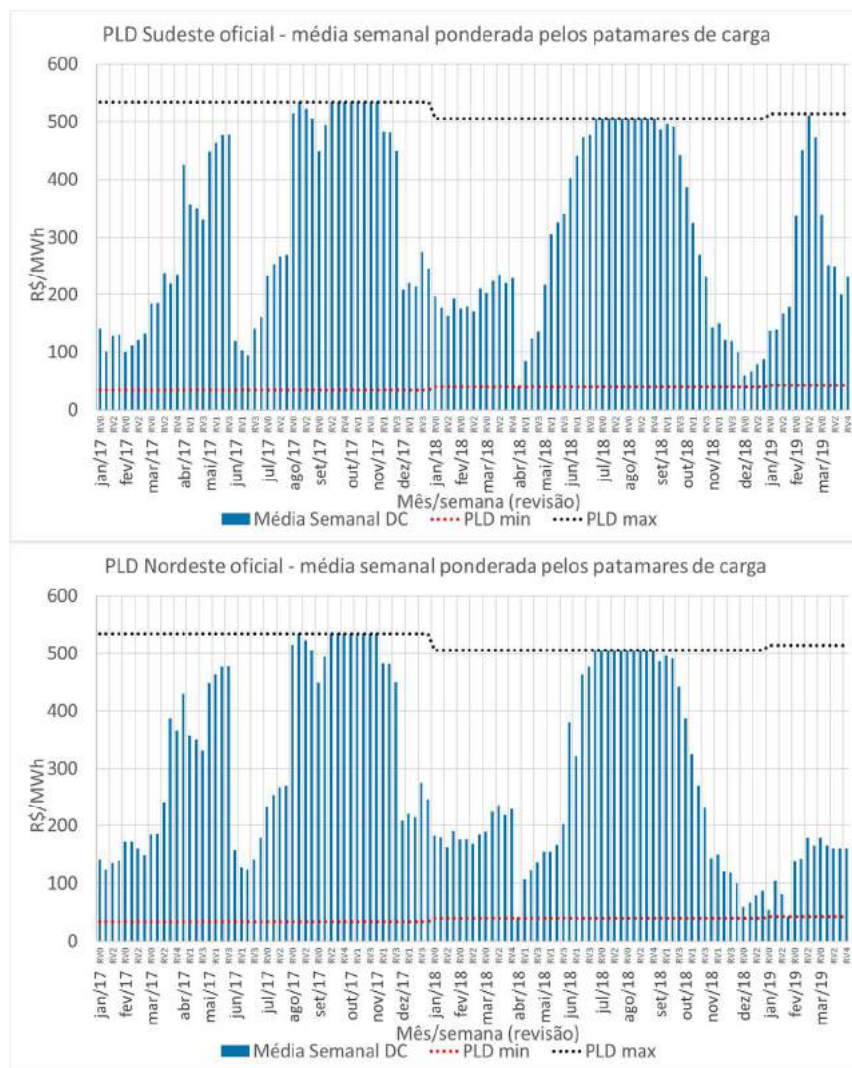


Figura 3 - Média semanal do PLD oficial recente para os quatro submercados (limitado em mínimo e máximo).



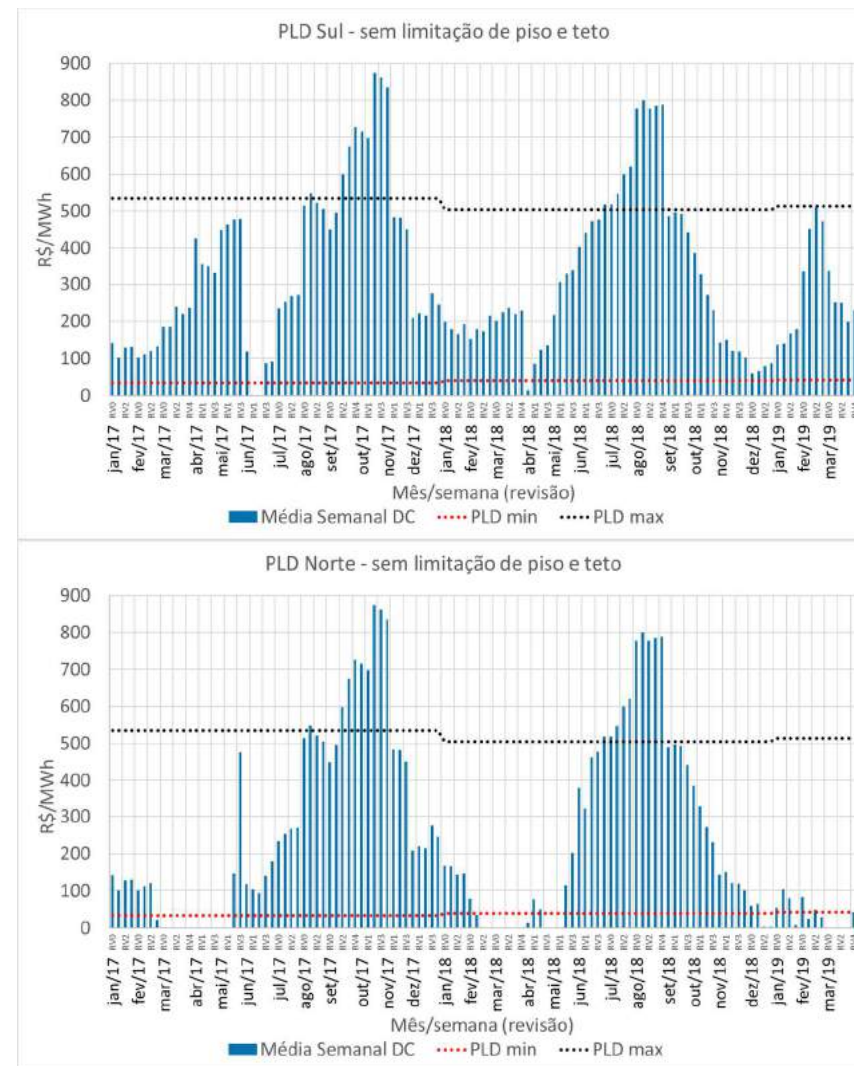
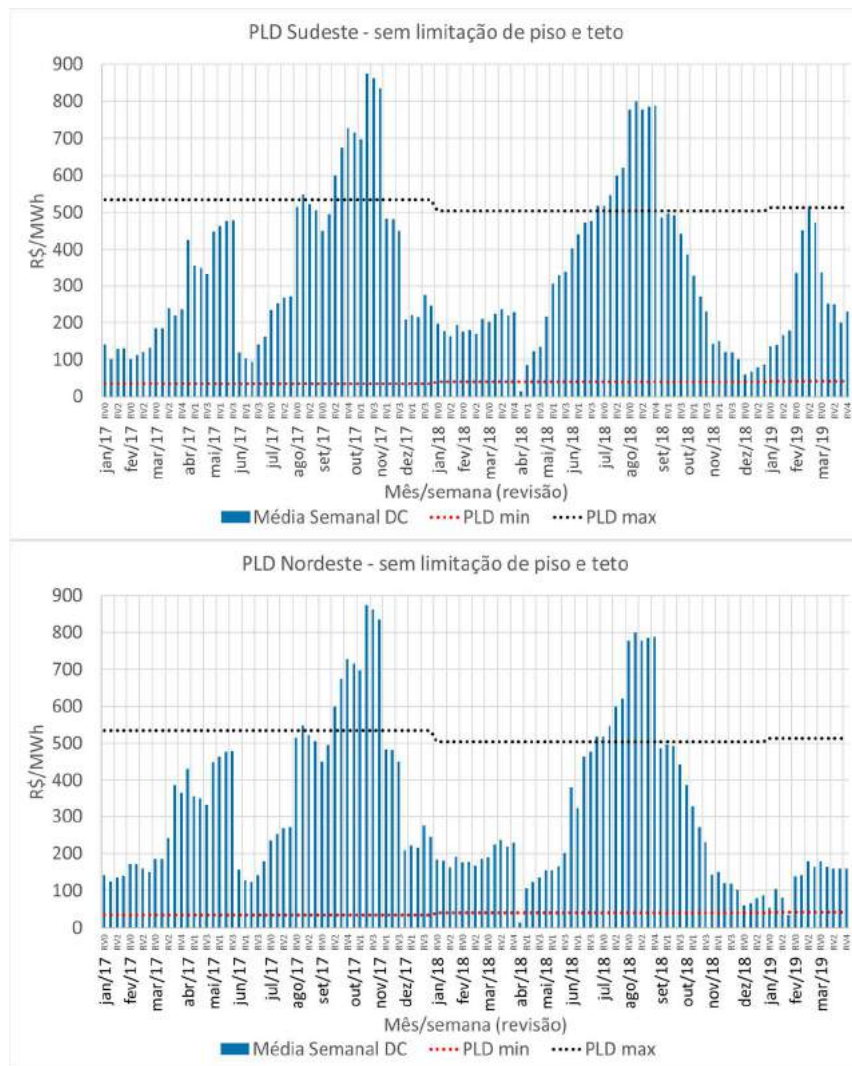


Figura 4 - Média semanal do PLD oficial recente para os quatro submercados (sem limitação de piso e teto, conforme calculado pelo DECOMP).



### 3) Estudos passados e frentes de investigação

Sendo o CMO/PLD os direcionadores de muitas das decisões operativas e comerciais relacionadas ao SIN, é desejável que apresentem maior estabilidade temporal, reduzindo a sua volatilidade, de maneira a conferir maior robustez às estratégias técnicas e comerciais, bem como maior previsibilidade aos agentes.

O GT Metodologia, por meio do Subgrupo Volatilidade, vem estudando alternativas para a mitigação da componente da volatilidade, focando principalmente no modelo NEWAVE e no seu modelo de geração de cenários de afluência, o GEVAZP. Dentre as possíveis causas de volatilidade previamente estudadas em ciclos anteriores, mas que não apresentaram alternativas de mitigação efetivas, estão:

1)     **Linearização da Função de Custo Futuro:** a Função de Custo Futuro (FCF) é linearizada por partes, pois na solução do problema via PDDE (Programação Dinâmica Dual Estocástica) a FCF é construída por um conjunto de hiperplanos de diferentes inclinações, tangentes à FCF real (desconhecida), cujas derivadas fornecem o CMO/PLD (Figura 5). A análise dos termos da FCF possibilita relacionar a variação do custo total esperado em função das variações nos valores de suas variáveis de estado (energias naturais afluentes e energia armazenada). As mudanças de acesso a cortes contíguos da FCF ocasionadas nos pontos de intersecção dos hiperplanos poderiam causar mudanças significativas no CMO/PLD, ao se passar de um corte de Benders para outro com pequenas variações de estados de armazenamento ou de tendência hidrológica, uma vez que cortes contíguos apresentam um comportamento não suave da FCF, resultando em derivadas descontínuas, o que pode provocar sobressaltos no comportamento do CMO/PLD. Apesar de ter sido levantado em ciclos passados (5), este tema ainda precisa ser analisado mais a fundo em próximos ciclos.

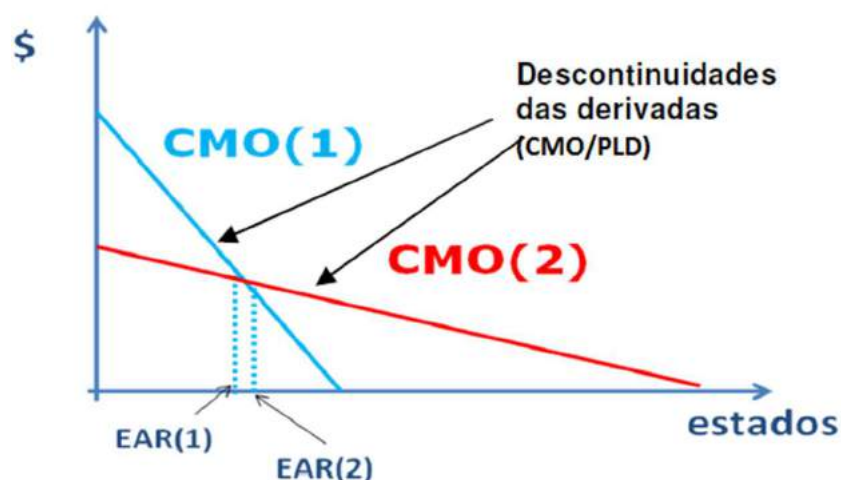


Figura 5 – Formação da Função de Custo Futuro pela intersecção de hiperplanos de diferentes inclinações, a partir dos quais se obtêm o CMO/PLD.

- 2) **Desconsiderar a tendência hidrológica do passado recente no cálculo da FCF:** avaliou-se não considerar a tendência hidrológica, afluições do passado recente, no cálculo da estratégia da operação e da formação de preços. Conforme visto na Figura 6, apesar de a não utilização de tendência hidrológica no NEWAVE reduzir a variação absoluta dos valores de PLD entre meses consecutivos, a trajetória de quedas e ascensões abruptas é mantida.

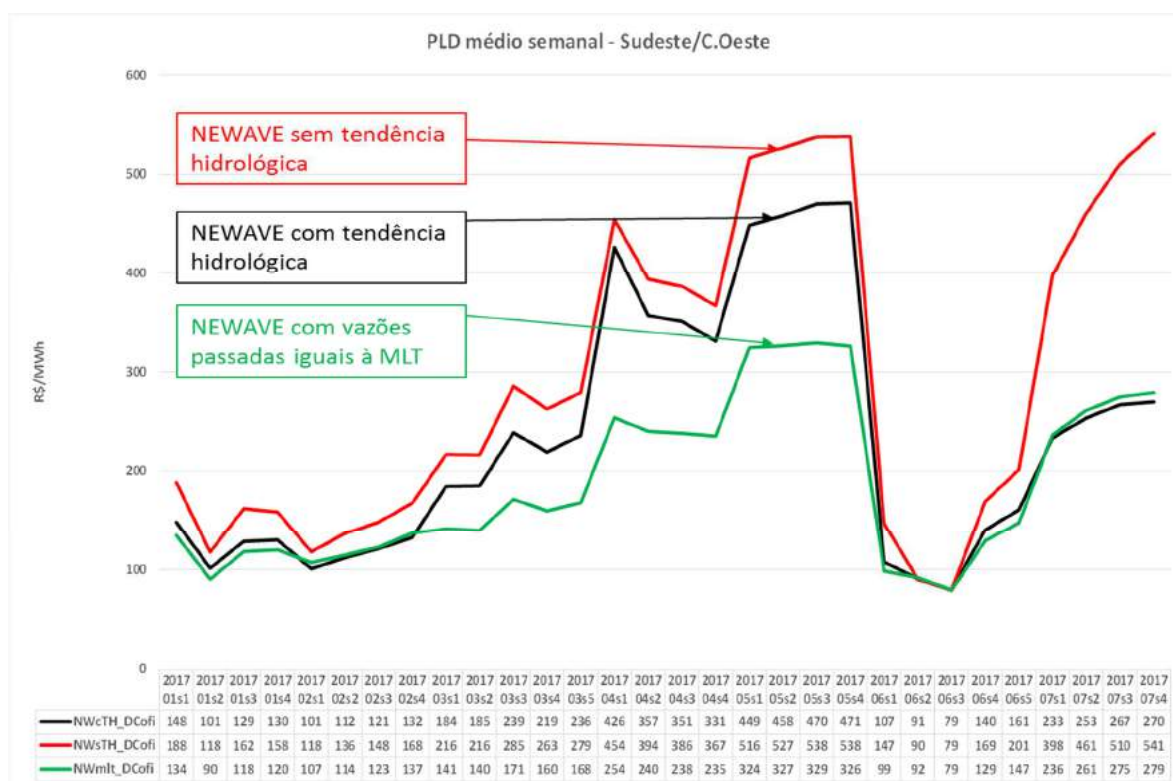


Figura 6 – Trajetórias de PLD com e sem tendência hidrológica no NEWAVE.

Concluiu-se pela não seleção desta alternativa como objeto do ciclo atual, pois os resultados do DECOMP indicaram que a FCF calculada considerando a tendência hidrológica conduz à obtenção de CMOs mais aderentes à situação conjuntural de afluências.

**3) Amostragem esparsa da FCF:** Por questões de viabilidade computacional, é considerado um número limitado de cenários na determinação da FCF. Com isso a distância entre os estados em que o custo futuro é calculado, e, portanto, a diferença entre as inclinações de dois planos adjacentes, pode ser relevante. O modelo NEWAVE tem os cenários de energia afluyente definidos através de uma amostragem seletiva, que considera para cada período uma amostra original de 100 mil vetores de ruídos distintos a partir da qual serão selecionados/gerados os cenários utilizados durante o processo de determinação da FCF. Estes mesmos cenários são utilizados em todas as iterações.

Considerando-se que o aumento do número de estados usados para construir a FCF resultaria em maior recobrimento do espaço de estados, com uma menor diferença entre as derivadas da FCF (Figura 7), foi desenvolvida uma versão que permite uso da reamostragem (plena ou recombinação) de cenários *forward* a cada  $n$  iterações, bem como uso do centroide do *cluster* de ruídos, e não mais o valor mais próximo do centroide, como o representante do *cluster* no processo de agregação de cenários. Essas implementações poderiam levar a uma redução da volatilidade do CMO/PLD causada pela mudança de corte acessado na FCF. Entretanto, o presente relatório apresentará, em seções futuras, que o uso de *centroide* e reamostragem plena, passo  $n=3$ , não tem impactos na volatilidade do CMO/PLD.

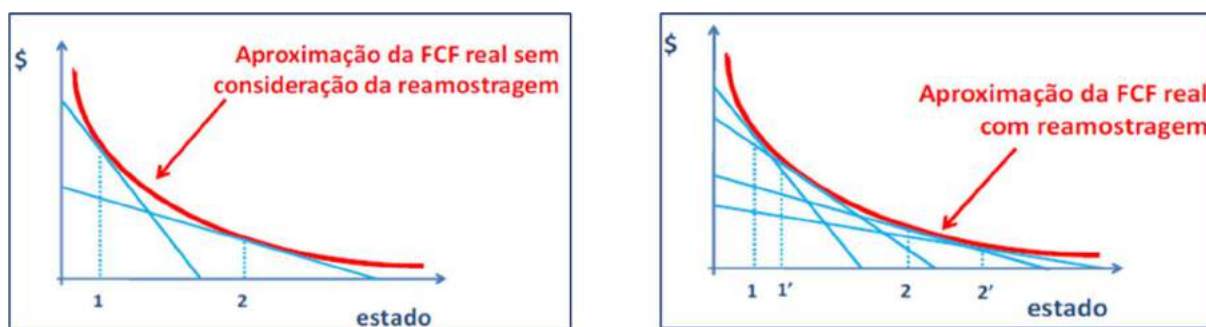


Figura 7 – Construção da FCF sem reamostragem (esq.) e com reamostragem (dir.).

**4) Atenuação do sinal de correlação temporal:** propõe-se atenuar o sinal de autocorrelação temporal da afluência entre cada mês do ano e os meses anteriores no cálculo

da estratégia da operação e da formação de preços. Após um processo de avaliação e teste, a proposta foi descartada, basicamente porque o modelo estocástico, com parâmetros alterados em relação ao histórico de afluições, seria inverossímil e não seria capaz de antecipar a ocorrência de secas de longa duração. Corroborando essas justificativas, nos testes realizados, foi observada a redução generalizada dos valores de CMO/PLD. Conforme será apresentado nas próximas seções, na etapa de testes do atual ciclo considerou-se alterar a metodologia de definição da ordem (número de estágios passados de afluição que influenciam nas afluições do estágio atual) do modelo autorregressivo PAR(p) para mitigação da volatilidade.

**5) Resolução linear por partes do problema de otimização:** levantou-se a hipótese de as aproximações lineares por partes na representação do problema de otimização (ex.: função de produção hidráulica, evaporação, restrições elétricas) serem causa de volatilidade do CMO/PLD. Para verificar esta hipótese, simulou-se o DECOMP no modo PLD único (um único cenário, com afluições e armazenamentos realizados). Na rodada de PL único, não há incerteza/mudanças no cenário de afluição, pois o problema de otimização é resolvido com o conhecimento perfeito do cenário de afluição ao longo de todo o horizonte. Conforme mostrado na Figura 8, observa-se que, na simulação do DECOMP (modo PL único) considerando a previsão hidrológica perfeita (vazões verificadas), o PLD resultante seria bastante estável ao longo do tempo (linha vermelha). Por outro lado, ao se refazerem as rodadas oficiais encadeadas de NEWAVE e DECOMP sem CVaR, nota-se que, apesar de menos elevado, o CMO/PLD ainda segue uma trajetória bastante volátil (linha verde). Com isso, concluiu-se que são a incerteza hidrológica e o consequente desvio nas previsões os responsáveis por provocar variações expressivas no CMO/PLD, de maneira que a linearização da representação do problema realizada pelo DECOMP não é causa de volatilidade.

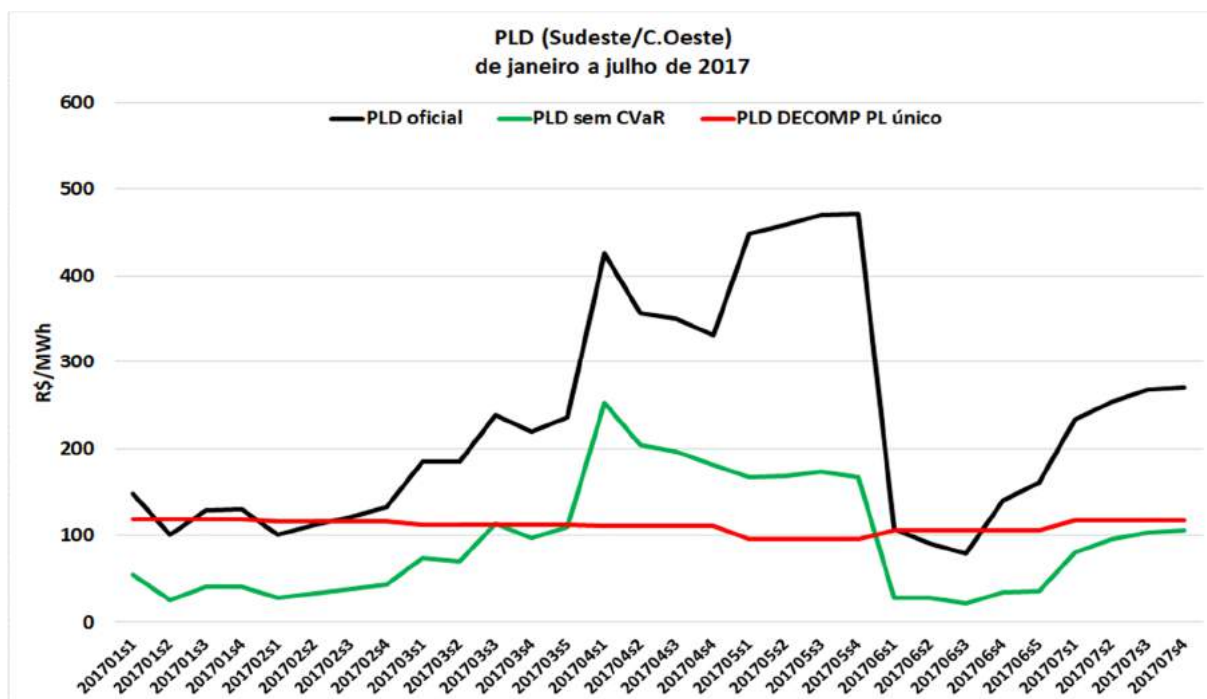


Figura 8 – Trajetória de CMO/PLD rodada com cenários estocásticos e com PL único.

**6) Média móvel do CMO/PLD:** considerou-se que o CMO/PLD utilizado no PMO e suas revisões fosse composto pela média do CMO/PLD obtido pelo modelo DECOMP com os valores obtidos nas quatro semanas anteriores. Descartou-se a proposta, por se julgar inadequado que as decisões fossem definidas com maior influência de informações referentes a acontecimentos do passado, e não com base em informações atualizadas.

**7) Combinação de previsões de afluição:** considerou-se adotar como vazão prevista para as futuras semanas do mês corrente uma combinação das previsões semanais, as quais são revistas a cada semana, com uma previsão invariante ao longo de todo o mês, definida na elaboração do PMO. A previsão invariante considera a média condicionada da previsão mensal de vazões elaborada com o uso do modelo GEVAZP (Figura 9). Os resultados indicaram que a combinação da previsão, apesar de reduzir a volatilidade do CMO/PLD, levou a maiores atrasos na captura das mudanças de tendência hidrológica ao longo do mês, impactando a política operativa. Este tema foi abordado pelo Subgrupo Volatilidade do CMO/PLD em 2011, cujo estudo está documentado em (5).

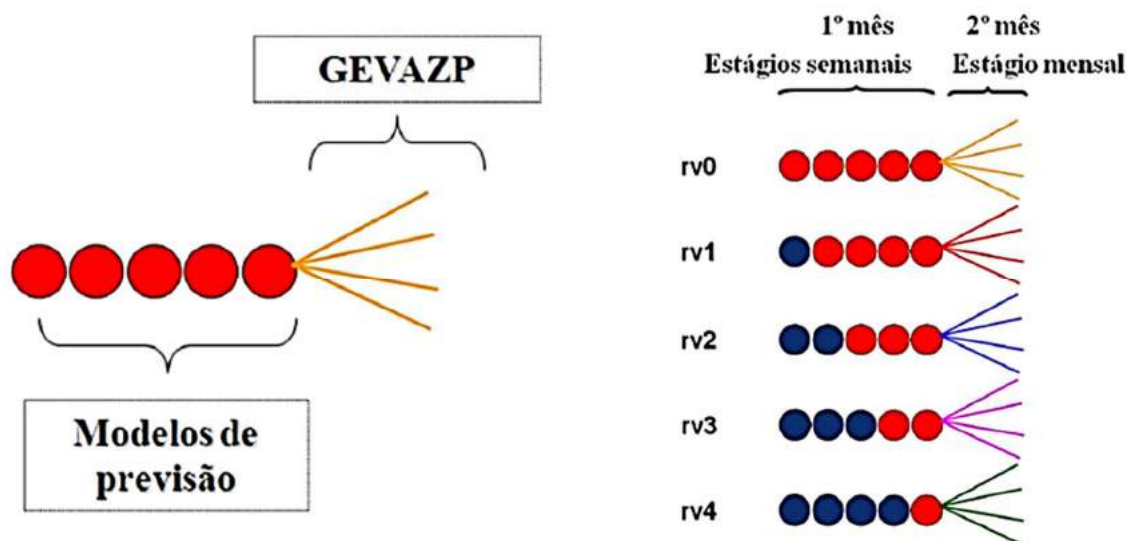


Figura 9 – Combinação de vazões previstas atualizadas a cada semana com vazões invariáveis ao longo do mês.

Apesar de reduzir a volatilidade intra-mês, os resultados mostraram que a combinação de previsões de vazões não diminui a distância entre o CMO/PLD obtido na última revisão e o primeiro CMO/PLD obtido no PMO de meses subsequentes, conforme indicado na Figura 10.

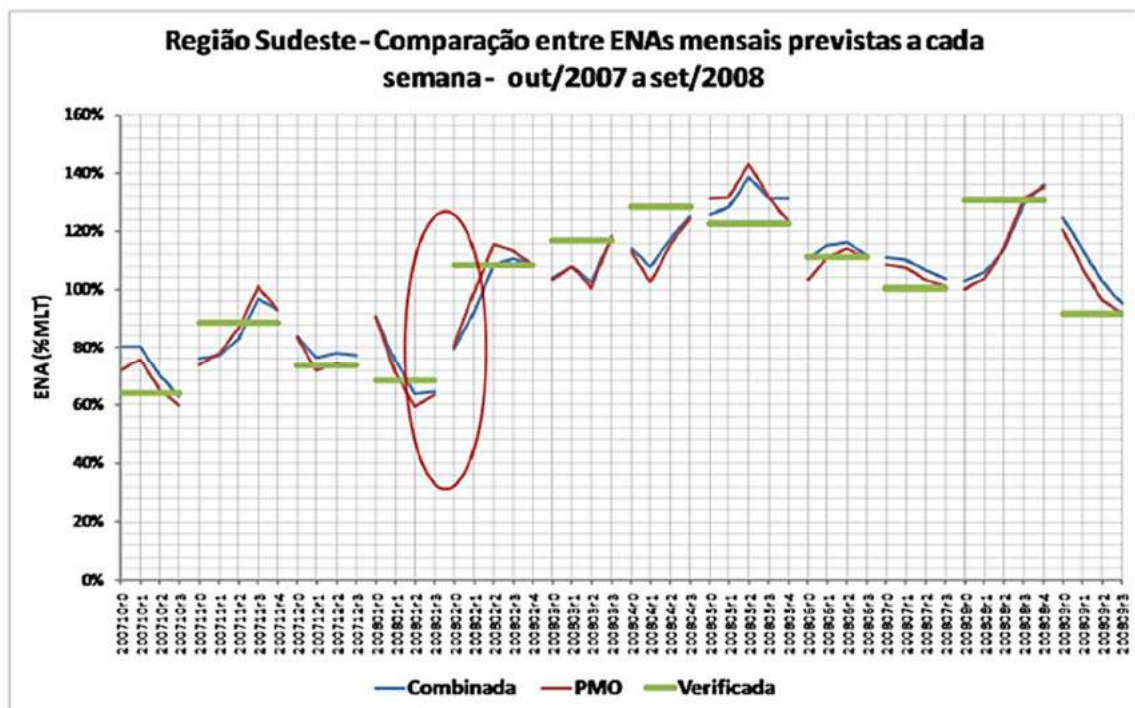


Figura 10 - Resultados de ENAs previstas com e sem combinação de vazões revisadas com uma parcela invariável.

**8) Extensão do horizonte do DECOMP:** tal alteração permitiria considerar a diversidade hidrológica entre as bacias por um maior número de meses, atenuando a influência da representação agregada (em Reservatórios Equivalentes de Energia – REEs) adotada na construção da FCF do modelo NEWAVE. Foi proposto avaliar o uso do modelo DECOMP de uma árvore de cenários para horizonte superior a dois meses, entretanto essa proposta eleva significativamente o tempo de execução do modelo DECOMP. Tal implementação permanece como potencial candidato à redução da volatilidade a ser estudado em ciclos futuros, além de ser item candidato a análise dentro do escopo da atividade Representação Hidrológica.

**9) Cenários semanais no DECOMP:** A abordagem da incerteza quanto aos cenários hidrológicos futuros a partir da segunda semana do DECOMP (abertura em cenários a partir da segunda semana, e não somente no segundo mês), permanece como um potencial candidato de redução da volatilidade do CMO/PLD, a ser investigado em ciclos futuros, pois alteraria o ponto de acoplamento do DECOMP com a FCF do NEWAVE, trazendo maior estabilidade às previsões de cenários.

O Programa Mensal de Operação (PMO) considera de forma determinística as vazões das semanas do primeiro mês. A cada semana a previsão é revista, e um novo valor médio mensal é utilizado para gerar os cenários do segundo mês, que por sua vez são utilizados para consultar a FCF fornecida pelo modelo NEWAVE.

Atualmente, o ONS utiliza o modelo chuva-vazão SMAP/ONS para previsão de vazões na primeira semana do horizonte em determinadas bacias do SIN. Até a elaboração deste relatório, o SMAP já estava sendo empregado nas bacias dos rios Paranaíba, Grande, Tietê, Paranapanema, Paraná (incremental de Itaipu), Iguaçu, Uruguai, São Francisco (até os postos São Romão e São Francisco) e Tocantins (até a UHE Serra da Mesa). Até o final de 2019, o ONS pretende utilizar o modelo SMAP na primeira semana do horizonte em todas as bacias do SIN. Também na diretriz de aperfeiçoamento das previsões de vazão, estuda-se, em paralelo, a incorporação da previsão de precipitação do modelo europeu ECMWF, além daqueles atualmente utilizados (Eta40 e GEFS), bem como a aplicação de metodologias de remoção de viés com base nos desvios recentes entre os volumes previstos e verificados nas bacias hidrográficas.



Acredita-se que essas frentes de trabalho auxiliarão na redução da volatilidade do CMO/PLD, uma vez que levarão a melhorias na previsão semanal de afluições no PMO e revisões. Adicionalmente, o ONS está desenvolvendo, em parceria com a Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC), uma metodologia para uso do modelo SMAP/ONS na previsão de um ou mais de cenários de vazões para todas as semanas do primeiro mês operativo. Essa utilização deverá contribuir para a estabilidade das previsões, influenciando ainda mais na mitigação da volatilidade do CMO/PLD.

Conforme apresentado na Figura 11, os cenários estocásticos gerados no segundo mês do DECOMP podem se acoplar à FCF do NEWAVE em pontos diferentes daqueles pontos de acoplamento da rodada da revisão anterior, uma vez que a trajetória dos cenários determinísticos de vazões previstos para as semanas do primeiro mês do horizonte se altera a cada revisão do PMO, afetando semanalmente o conjunto de cenários gerados para o segundo mês.

Uma possível alternativa de mitigação dessa variabilidade seria a utilização do SMAP/ONS não apenas para previsão da primeira semana a frente, mas para todo o horizonte do primeiro mês operativo, podendo tornar menos volátil a trajetória das vazões determinísticas. Sendo um modelo físico de transformação da chuva em vazão, o modelo SMAP/ONS percebe a resposta do solo e dos cursos d'água às previsões de precipitações, sendo capaz de separar o escoamento superficial do escoamento de base. Essa representação permite que a previsão de vazões seja mais realista para o 1º mês a frente, pois melhor interpreta o balanço hídrico da água nas bacias, não considerando apenas o histórico de vazões na previsão das semanas seguintes.

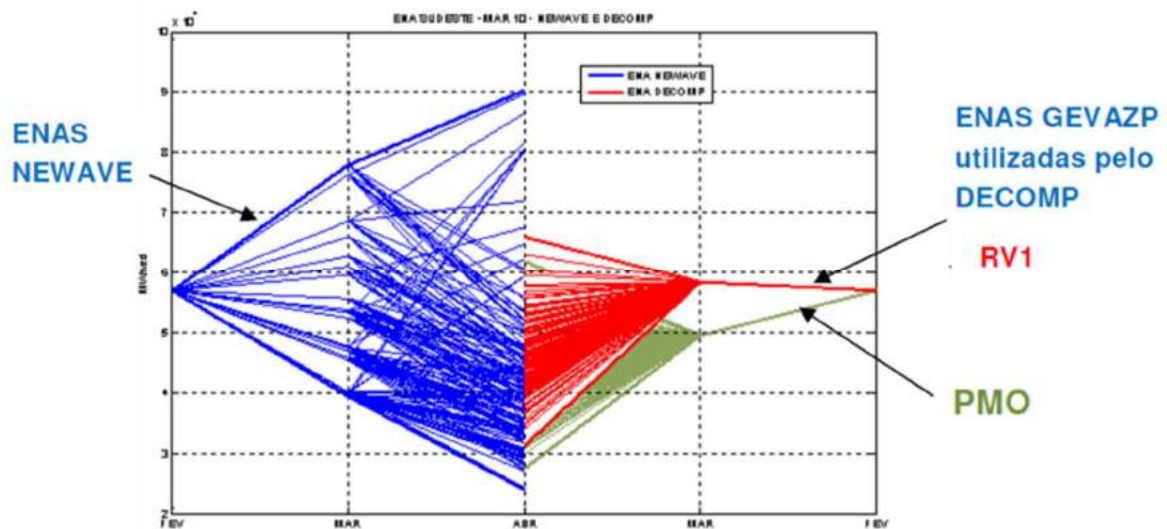


Figura 11 – Acoplamento dos cenários de afluências do segundo mês do DECOMP com a FCF do NEWAVE para as previsões do PMO e para a primeira revisão semanal.

No presente ciclo, as metodologias estudadas como candidatas à mitigação da volatilidade do CMO/PLD foram:

- **Não-redução automática da ordem** do modelo autorregressivo periódico de geração de cenários de afluência,  $PAR(p)$ , quando da ocorrência de coeficientes negativos no modelo autorregressivo que podem levar à construção de cortes com inclinação positiva na Função de Curto Futuro do NEWAVE;
- **Utilização de correlação espacial em base mensal** de ENAs entre REEs, em substituição à correlação espacial em base anual atualmente empregada no modelo GEVAZP utilizado tanto pelo DECOMP como pelo NEWAVE.

Conforme citado anteriormente, dado que a utilização de reamostragem de cenários *forward* no NEWAVE havia sido cogitada como candidata à mitigação da volatilidade e que a versão que permite tal utilização já foi implementada, análises complementares utilizando reamostragem de cenários *forward* (e uso do centroide como representante no processo de agregação de ruídos) foram realizadas, e seus resultados são apresentados na seção 4.3.

As próximas seções descrevem em detalhes as metodologias desenvolvidas para avaliação e os resultados obtidos.

## 4) Metodologia

### 4.1) Ordem do PAR(p)

No NEWAVE, a geração de cenários estocásticos de afluências é interna ao modelo computacional, sendo inclusive necessária para o algoritmo de otimização, o modelo estatístico adotado para geração de cenários hidrológico é do tipo Periódico Autorregressivo de Ordem  $p$  - PAR(p), na sigla em Inglês. O PAR(p) é um modelo autorregressivo cujos parâmetros apresentam um comportamento periódico. É utilizado para representar séries hidrológicas mensais, as quais apresentam média, variância, assimetria e estrutura de autocorrelação de comportamento periódico. A ordem  $p$  refere-se à quantidade de estágios passados que o modelo leva em consideração ao prever as ENAs de um dado estágio  $m$  (no caso, mês).

Na Figura 12 são mostradas as ENAs realizadas, mês a mês, para todos os REEs, nos últimos 10 anos, com base na configuração hidráulica de abril/2019. Os REEs estão ordenados da maior para a menor MLT. Como se pode observar, enquanto para os REEs mais ao sul (Sul, Iguaçu, Itaipu, Paranapanema) não há uma sazonalidade bem definida, para os REEs localizados no Sudeste/Centro-Oeste e no Nordeste (Paraná, Nordeste, Madeira, Sudeste, Teles Pires) nota-se uma sazonalidade bem definida, com período úmido iniciando em novembro e terminando em abril. Para os REEs geograficamente ao norte (Norte, Belo Monte, Manaus-Amapá), nota-se uma sazonalidade ainda mais acentuada, com variações mais exacerbadas entre as ENAs dos períodos úmido e seco. Além disso, o período úmido é um pouco defasado temporalmente em relação aos demais REEs, finalizando em maio.

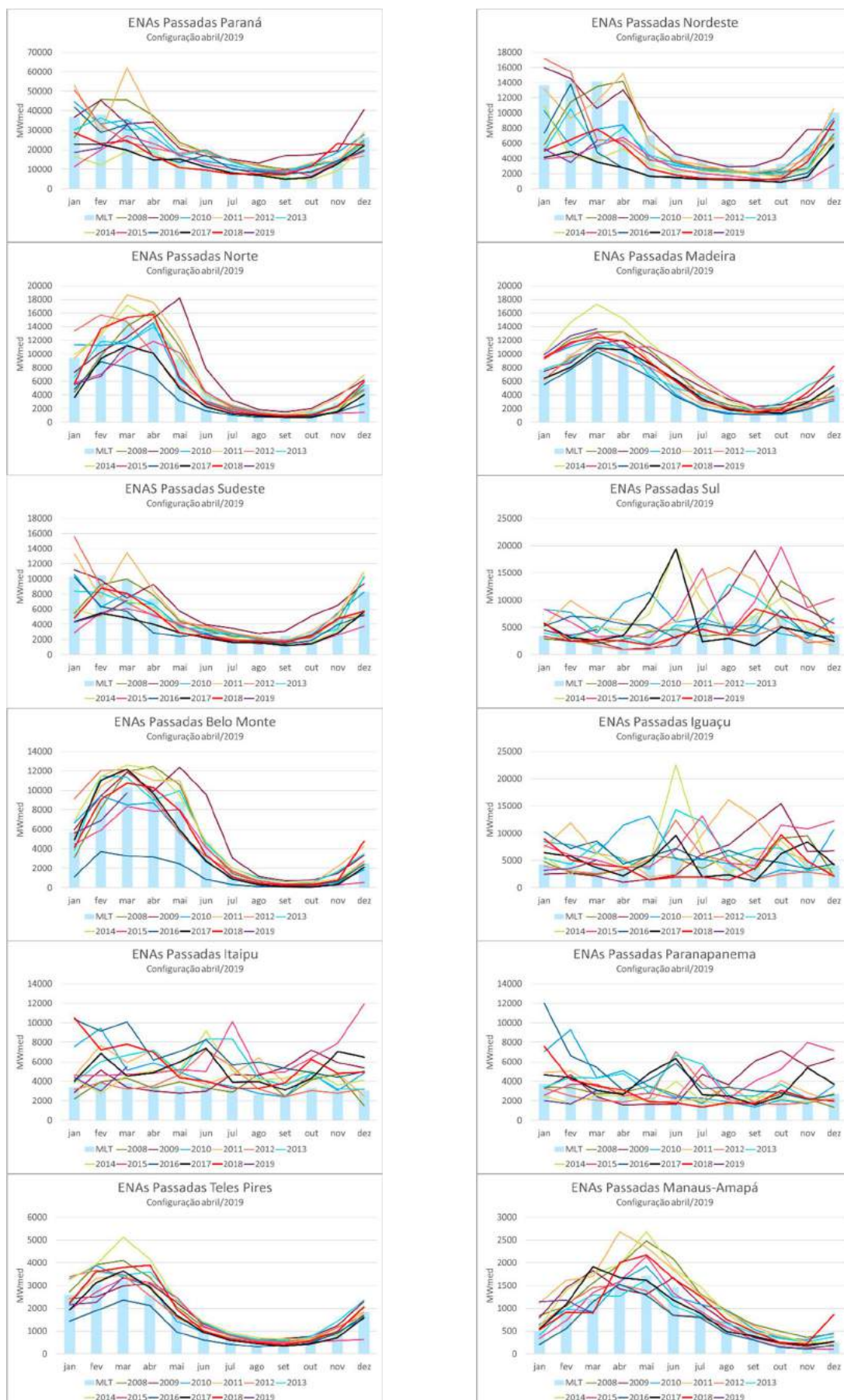


Figura 12 – ENAs realizadas nos últimos 10 anos e MLT de cada REE.

A ordem do modelo varia conforme o mês. Assim, por exemplo, a quantidade de meses passados (ordem) que o modelo considera para projetar as ENAs de janeiro pode ser diferente da de julho. A ordem também varia para cada REE, dependendo do comportamento hidrológico do mesmo. Apesar de ser possível olhar até 11 meses atrás no NEWAVE, por por Procedimento de Rede (6), a ordem máxima usada é de 6 meses. A Figura 13 ilustra, para alguns REEs, a ordem do modelo para cada mês, nos PMOs oficiais de 2018. Como se pode verificar, apesar de a ordem não se alterar com a configuração do PMO e de, em geral, as ordens do período seco serem superiores às do período úmido, não há uma sazonalidade nítida das ordens para os REEs, com base nos períodos úmido ou seco, ou seja, a ordem definida varia bastante entre os meses, mas não segue um padrão claro à medida em que o período seco avança.

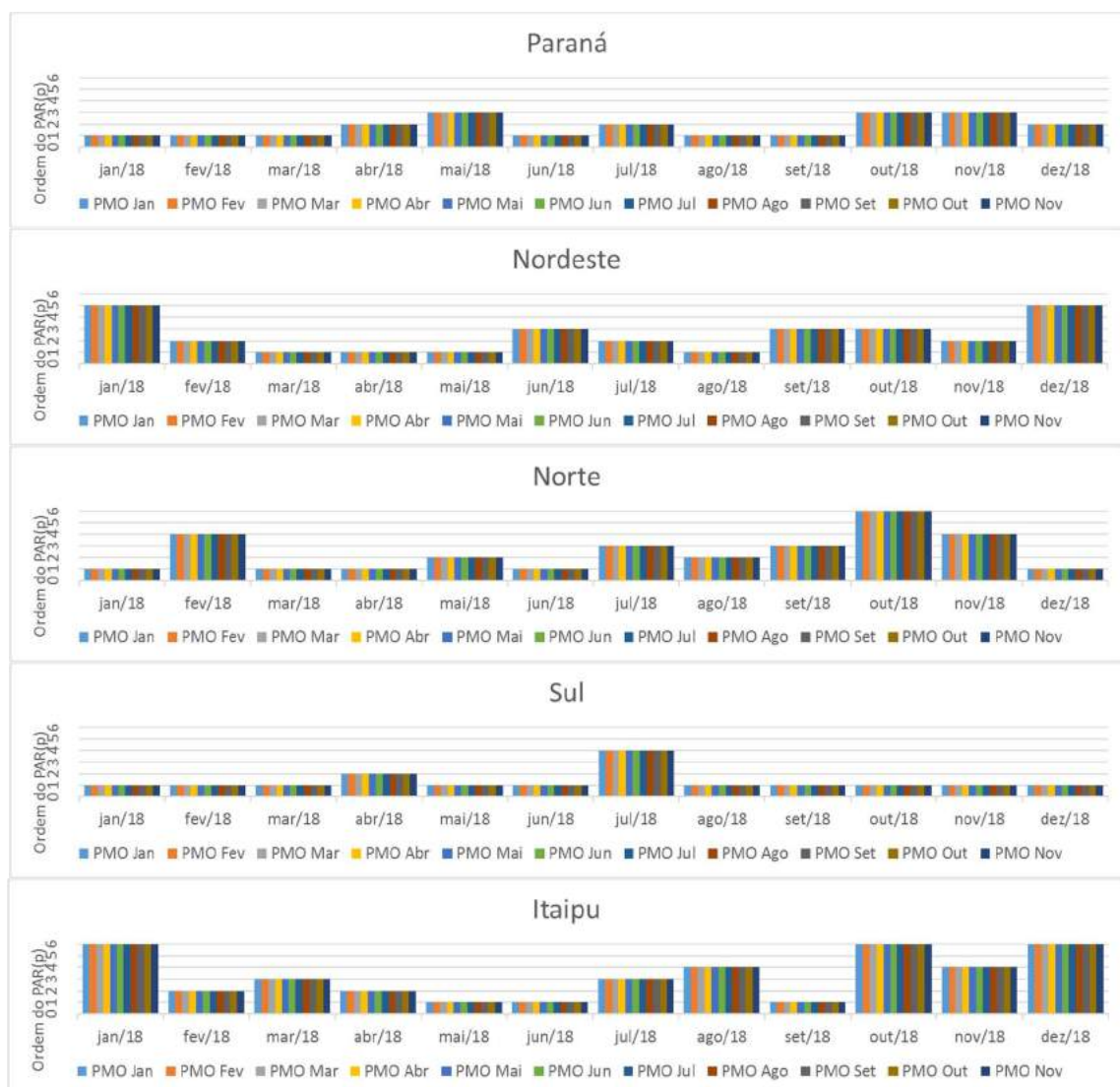


Figura 13 – Ordens do PAR(p) de cada mês, por REE, para os PMOs de 2018.

O ajuste da ordem do modelo PAR(p) passa pelas seguintes etapas (3):

**1) Identificação do modelo:** escolha da ordem do modelo por meio de estimativas do vetor  $p$  (escolha da ordem mais apropriada dos operadores autorregressivos de cada período  $p$ ).

**2) Estimação do modelo:** estimação dos diversos parâmetros do modelo, por meio de estimadores de máxima verossimilhança ou suas aproximações.

**3) Verificação do modelo:** verificação, através de testes estatísticos, se as hipóteses assumidas nas etapas anteriores são atendidas.

A etapa 1 que corresponde à identificação da ordem do modelo é baseada na análise da função de autocorrelação parcial (FACP). Nesta análise é verificada qual a maior ordem (começando de 6 e decrescendo até 1) cujo coeficiente de autocorrelação parcial do registro histórico de ENA (Energia Natural Afluente) é significativo. Para ser significativo, o coeficiente de autocorrelação parcial deve ficar fora do intervalo de confiança de 95%, dado por  $\left[-\frac{1,96}{\sqrt{n}}; +\frac{1,96}{\sqrt{n}}\right]$

Ou seja, na etapa de escolha da ordem do modelo, para cada mês de cada REE, o PAR(p) inicia, a partir da ordem 6 em sentido decrescente, verificando qual o primeiro coeficiente de autocorrelação que se encontra fora do referido intervalo, ou seja, qual o maior coeficiente de autocorrelação estatisticamente diferente de zero. A primeira ordem a satisfazer esse critério será a ordem selecionada pelo modelo.

No entanto, este nem sempre é o caso: coeficientes autorregressivos negativos de afluência em um mês específico podem provocar a presença de um coeficiente positivo associado à afluência prevista para um mês anterior no corte de Benders que descreve a FCF deste mês. Um corte de Benders positivo leva a uma não convexidade da FCF, o que pode ocasionar uma sinalização não esperada. Por exemplo, se atualizar a previsão da afluência para o mês em curso: o CMO associado a uma previsão de afluência, por exemplo, superior à média do mês é maior que o CMO associado a uma previsão de afluência inferior à média do mês. Uma solução para o problema é analisar novamente a função de autocorrelação do mês em questão, procurando o próximo coeficiente significativo. A ordem deste novo coeficiente será o novo valor de  $p$ . Este procedimento é repetido até que o conjunto de parâmetros de todos os meses não produza contribuição negativa em qualquer mês futuro (7).



Esta implementação, de verificação e redução automática da ordem quando necessário, foi introduzida nos modelos NEWAVE e GEVAZP a partir de 2001, após observação de ocorrência de aumento do CMO/PLD em cenários com vazão mais elevada, devido às derivadas positivas que sinalizavam um aumento de custo com um aumento da afluência.

#### 4.1.1) Não redução da ordem do PAR(p)

A primeira metodologia cogitada como potencial candidata à mitigação da volatilidade do CMO/PLD foi a não aplicação desta redução automática da ordem do PAR(p) quando da ocorrência de cortes indesejáveis na FCF. Para isso, desde a versão 25.2 foi incluída no modelo NEWAVE a possibilidade de se optar pela não verificação da ocorrência de coeficientes negativos que gerem cortes positivos, de maneira que a primeira ordem com coeficientes de autocorrelação temporal estatisticamente relevantes (fora do intervalo de confiança) seja aquela efetivamente utilizada pelo modelo.

A Figura 14 a seguir ilustra, para os casos oficiais de PLD de janeiro/2018, a alteração das ordens do modelo, para cada mês do referido ano e cada REE, quando ocorre a redução da ordem. Os meses em que houve alteração na ordem estão destacados em vermelho. Para os REEs Sudeste, Itaipu, Norte e Manaus-Amapá não houve redução na ordem calculada para nenhum mês. Enquanto isso, para os REEs Belo Monte e Teles Pires houve, em alguns meses, mais de uma redução de ordem seguida, até que se alcançasse uma ordem que não gerasse cortes indesejáveis na FCF. Os REEs estão dispostos em ordem decrescente de ENA (Média de Longo Termo - MLT).

Percebe-se que, para a maioria dos REEs, tem-se pelo menos um mês em que houve redução da ordem. Além disso, a variação geralmente é elevada, passando-se de uma ordem de valor 6 ou 5 para a ordem 1, ou seja, implicaria em uma alteração significativa do número de meses passados que são considerados na geração de cenários futuros de hidrologia. Portanto, a não redução automática da ordem poderia provocar diferenças significativas nos cenários de ENA gerados e, possivelmente, na trajetória de volatilidade do CMO/PLD.



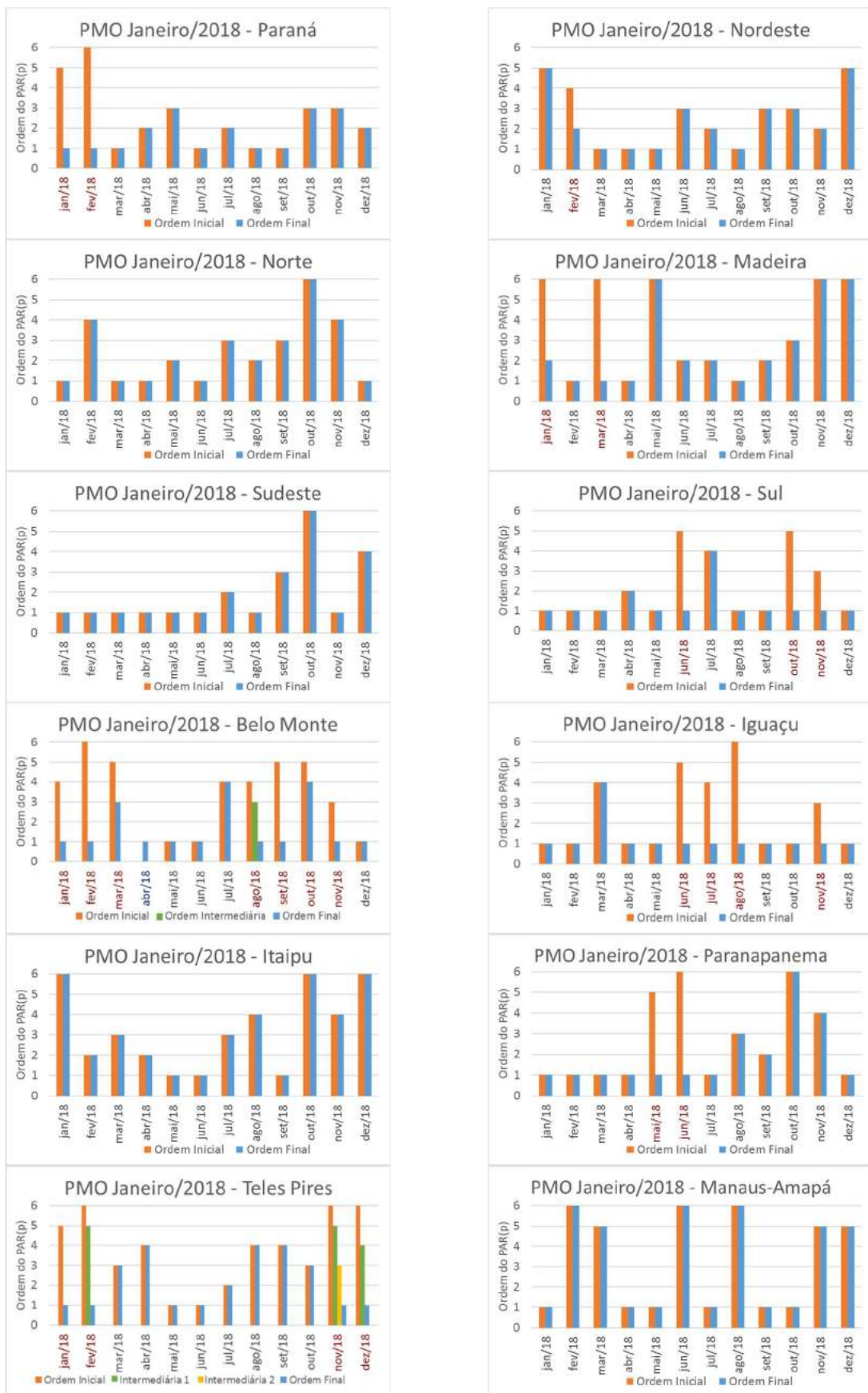


Figura 14 - Maiores ordens do PAR(p) estatisticamente significativas e ordens finais utilizadas após verificação da ocorrência de cortes indesejáveis na FCF.

Para verificar o impacto da não redução automática da ordem do PAR(p) nos valores de CMO/PLD e, mais especificamente, na trajetória de volatilidade dos preços, os eventos recentes de volatilidade mencionados anteriormente, referentes aos trimestres maio-junho-julho/2017, março-abril-maio/2018 e janeiro-fevereiro-março/2019 (casos oficiais de NEWAVE e DECOMP de PLD), foram simulados, de maneira encadeada, na versão 25.2 do modelo NEWAVE e na versão 29 do modelo DECOMP em duas situações diferentes:

- 1) com acionamento da verificação automática da ordem do PAR(p): quando determinada ordem estatisticamente relevante produz um coeficiente que gere cortes indesejáveis na FCF, procede-se à próxima ordem estatisticamente relevante, cujo coeficiente gerado será novamente verificado, antes de se estabelecer a ordem final a ser utilizada (metodologia atualmente empregada no NEWAVE); e
- 2) sem a referida verificação da ordem, isto é, mesmo que a maior ordem estatisticamente relevante produza cortes indesejáveis na FCF, esta ainda será a ordem final a ser utilizada.

Os resultados estão apresentados na Seção 5).

#### 4.1.2) Critérios de informação para seleção da ordem de modelos matemáticos

Critérios de informação são dedicados a classificar modelos candidatos à representação de um fenômeno por meio de uma pontuação atribuída a eles.

Em geral, quanto menor a pontuação atribuída, melhor é o modelo.

Os critérios de informação costumam incluir uma penalização à pontuação dos modelos candidatos para evitar *over-fitting*, que geralmente considera o número de parâmetros do modelo e sua complexidade.

Seja a função de desvio de um modelo com parâmetros  $\theta$ :

$$D(\theta) = -2\log\{p(\mathbf{y}|\theta)\}$$

Onde  $\mathbf{y}$  é um vetor com as amostras observadas e  $p(\mathbf{y}|\theta)$  é a probabilidade de ocorrência de  $\mathbf{y}$  dado  $\theta$ .

Sendo:

$\hat{\theta} = E_{\theta|\mathbf{y}}\theta$  a estimativa por máxima verossimilhança,

Então:

$$D(\hat{\theta}) = -2\log\{p(\mathbf{y}|\hat{\theta})\}$$
 é o máximo desvio “ajustado”

A seguir são listados os principais critérios de informação:

1) **Critério de Informação de Akaike:** o critério de informação de Akaike (AIC) é dado por (8):

$$AIC = D(\hat{\theta}) + 2k$$

Onde  $k$  é a dimensão do modelo (ou número de parâmetros),  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_k)$ .

2) **Critério de Informação Bayesiano:** o critério de informação Bayesiano (BIC) é dado por (9):

$$BIC = D(\hat{\theta}) + \log(n)k$$

Onde  $n$  é o tamanho da amostra,  $\mathbf{y} = y_1, \dots, y_n$

3) **Critério de Informação de Hannan-Quinn:** o critério de informação de Hannan-Quinn é dado por (10):

$$HQC = D(\hat{\theta}) + 2 \log(\log(n)) k$$

É comum que, em modelos hierárquicos bayesianos, a escolha de  $k$  e de  $n$  não seja clara. O critério de informação de Hannan-Quinn sugere uma penalização independente desses valores.

4) **Critério de Informação de Desvio:** seja  $p_D$  o “número efetivo de parâmetros”, dado pelo desvio “esperado” menos o desvio “ajustado”:

$$p_D = E_{\theta|\mathbf{y}} D(\theta) - D(\hat{\theta})$$

o critério de informação de desvio (DIC) é dado por (11):

$$DIC = E_{\theta|\mathbf{y}} D(\theta) + p_D = 2E_{\theta|\mathbf{y}} D(\theta) - D(\hat{\theta})$$

Os quatro critérios de informação buscam penalizar modelos com um número alto de parâmetros, somando a ele um termo dependente do número de parâmetros ou da qualidade do ajuste. A Tabela 1 a seguir resume as penalizações de cada critério:

Tabela 1 - Penalizações dos critérios de informação a modelos com ordens elevadas.

| Critério de Informação                                                                             | Penalização                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| $AIC = D(\hat{\theta}) + 2k$                                                                       | Duas vezes o número de parâmetros                         |
| $BIC = D(\hat{\theta}) + \log(n)k$                                                                 | Logaritmo do número de parâmetros                         |
| $HQC = D(\hat{\theta}) + 2\log(\log(n))k$                                                          | Logaritmo do logaritmo do número de parâmetros            |
| $DIC = E_{\theta \mathbf{y}} D(\theta) + p_D = 2E_{\theta \mathbf{y}} D(\theta) - D(\hat{\theta})$ | “Complexidade”: desvio “esperado” menos desvio “ajustado” |

Como os critérios de informação mencionados buscam uma minimização da ordem final do modelo por meio da aplicação de penalizações, a adoção dos mesmos para seleção da ordem do PAR(p) levaria, possivelmente, a ordens menores do que as atualmente praticadas. Com uma ordem reduzida, a hidrologia recente passaria a ter ainda mais influência na precificação, levando a um aumento da volatilidade, e não à sua diminuição. Por esta maneira, tal linha de aprimoramento foi descartada para o presente ciclo para esta finalidade. No entanto, uma revisão dos critérios de informação aplicados à seleção da ordem do PAR(p) não fica descartada como escopo do Subgrupo Volatilidade da CPAMP para ciclos futuros.

#### **4.2) Correlação espacial mensal**

No modelo NEWAVE (decks de PMO e PLD), as usinas hidrelétricas (UHEs) são agrupadas em 12 Reservatórios Equivalentes de Energia (REEs). Nesse agrupamento, uma bacia hidrográfica pode conter aproveitamentos que pertencem a REEs distintos e um REE pode abranger mais de uma bacia hidrográfica. Devido a isso e à localização geográfica das bacias, existe uma certa dependência entre os REEs. Logo, existe uma correlação espacial de ENAs entre REEs: REEs vizinhos apresentam padrões hidrológicos similares ao longo do ano. A Figura 15 ilustra a localização geográfica dos REEs, com base nas UHEs que os compõem: REEs cujos nomes estão apresentados com um fundo colorido são compostos pelas bacias preenchidas pela mesma cor, enquanto REEs com fundo branco e contorno colorido são compostos pelas bacias delimitadas pela mesma cor.



Figura 15 – Representação geográfica dos REEs com base nas bacias hidrográficas onde suas respectivas usinas estão localizadas.

O modelo PAR(p) atualmente utiliza a correlação espacial de ENA entre REEs em base anual para gerar vazões futuras com discretização mensal. No entanto, conforme mostra a Figura 16, que apresenta as correlações espaciais entre o REE Paraná (aquele com maior ENA MLT) e os demais REEs, calculadas com base nas ENAs do histórico para a configuração hidráulica de abril/2018, o comportamento da correlação espacial média anual pode ser bastante distinto do comportamento discretizado mensalmente da mesma correlação espacial em base mensal.



Figura 16 – Correlações espaciais em bases mensal e anual do REE Paraná e demais REEs calculadas com base no histórico para a configuração hidráulica de abril/2018.



Como se pode verificar, em muitos casos não apenas os valores mensais de correlação espacial diferem bastante do valor médio anual, mas também os sinais podem se inverter. Isso sugere que, caso se utilizasse a correlação espacial em base mensal ao invés de anual no PAR(p), os resultados obtidos de ENAs, bem como a trajetória de volatilidade do CMO/PLD, poderiam ser diferentes. O mesmo foi observado para as correlações dos demais REEs.

Logo, optou-se por avaliar a utilização de correlação espacial mensal de ENA entre REEs como uma segunda alternativa de mitigação da volatilidade do CMO/PLD.

Para verificar tal impacto, os eventos recentes de volatilidade mencionados anteriormente, foram simulados de maneira encadeada na versão 25.5 do modelo NEWAVE e na versão 29 do modelo DECOMP (casos oficiais de NEWAVE e DECOMP da CCEE) em duas situações diferentes: 1) com correlação espacial anual; e 2) com correlação espacial mensal.

#### **4.3) Centroide + reamostragem dos cenários *forward***

Conforme mencionado anteriormente, dado que a implementação no NEWAVE do uso do centroide como representante de agregação de ruídos no PAR(p) e da reamostragem de cenários *forward* alteram tanto os cenários de ENA gerados como o recobrimento da árvore de cenários, o que pode, em tese, alterar a trajetória de volatilidade do CMO/PLD, desta forma, optou-se por incluir tais metodologias como um terceiro candidato à mitigação do CMO/PLD a ser estudado.

O uso do centroide, e não mais do ruído mais próximo ao centroide como representante de agregação de cenários (Figura 17) reduz a variabilidade amostral dos cenários gerados, reduzindo a chance de ocorrência do efeito “dente” na trajetória do CMO/PLD e aumentando a robustez dos resultados (12).



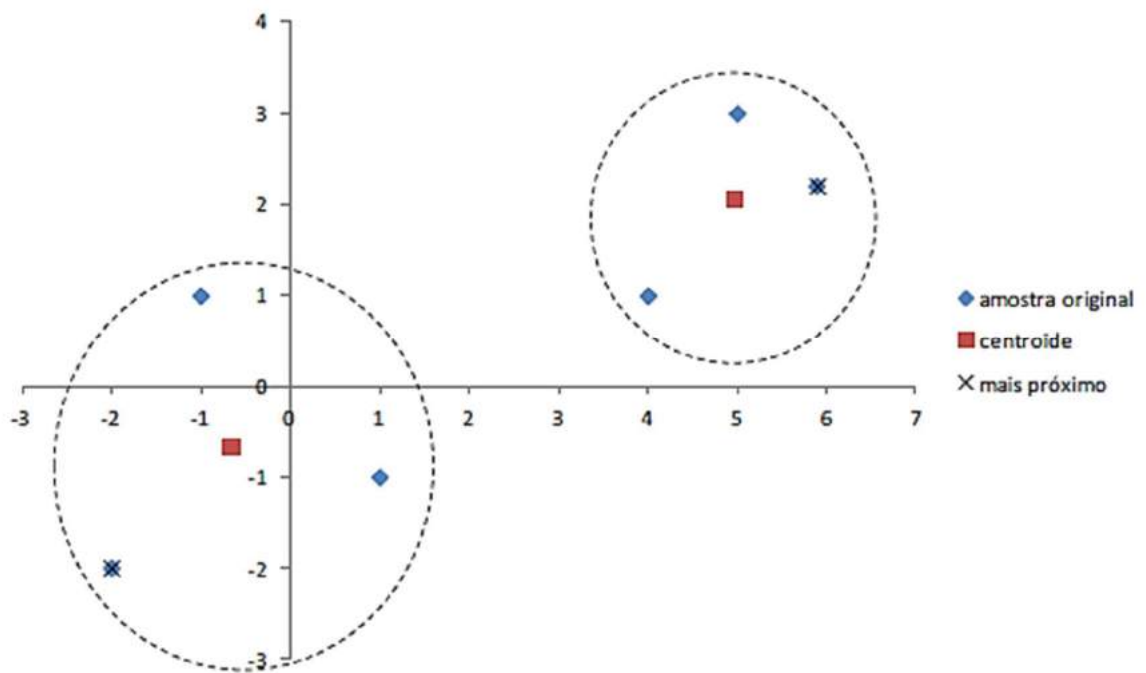


Figura 17 – Exemplo didático sobre o representante do processo de agregação: mais próximo e centroide (12).

O processo de reamostragem de cenários *forward* de afluências consiste em empregar diferentes subárvores em cada iteração, de maneira a permitir que uma parcela mais representativa da árvore de cenários seja visitada (13). A Figura 18 ilustra como, utilizando a reamostragem, a cada iteração ramos diferentes da árvore de cenários são visitados, de maneira que, ao final, o número de cenários utilizados na construção da FCF seja maior.

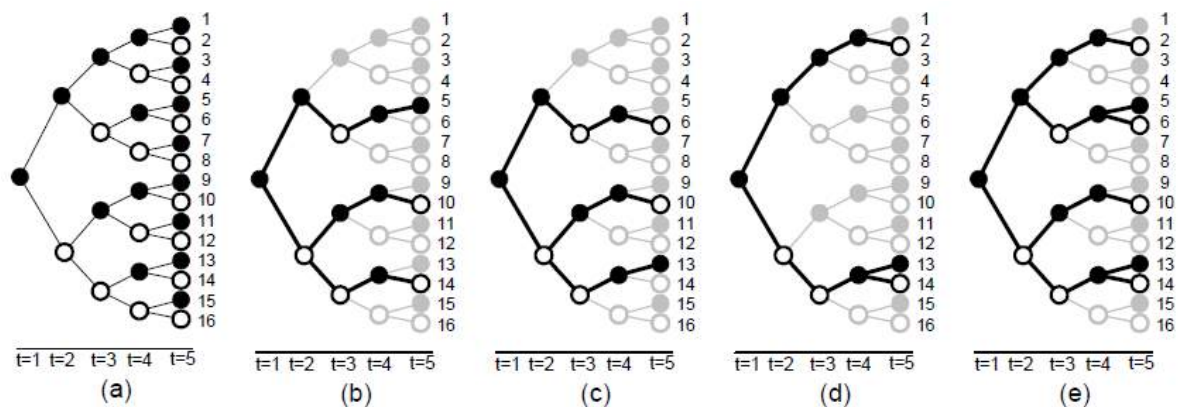


Figura 18 – Percurso de diferentes cenários da árvore a cada iteração com reamostragem da *forward* (13).

## 5) Resultados

### 5.1) Não redução da ordem do PAR(p)

A Figura 19 e a Figura 20 ilustram, as trajetórias de CMO/PLD do submercado Sudeste/Centro-Oeste (sem se aplicarem valores mínimo e máximo), para as rodadas encadeadas pelos armazenamentos, com e sem redução automática da ordem, do NEWAVE (saídas do primeiro mês do horizonte) e das respectivas revisões do DECOMP (média semanal, ponderada por patamar), para os trimestres maio-junho-julho/2017, março-abril-maio/2018 e janeiro-fevereiro-março/2019. Como se pode ver, a redução ou não da ordem do PAR(p) quando da ocorrência de cortes indesejáveis na FCF possui pouca influência na trajetória de volatilidade do CMO/PLD. Os resultados para os demais submercados encontram-se em Anexo.

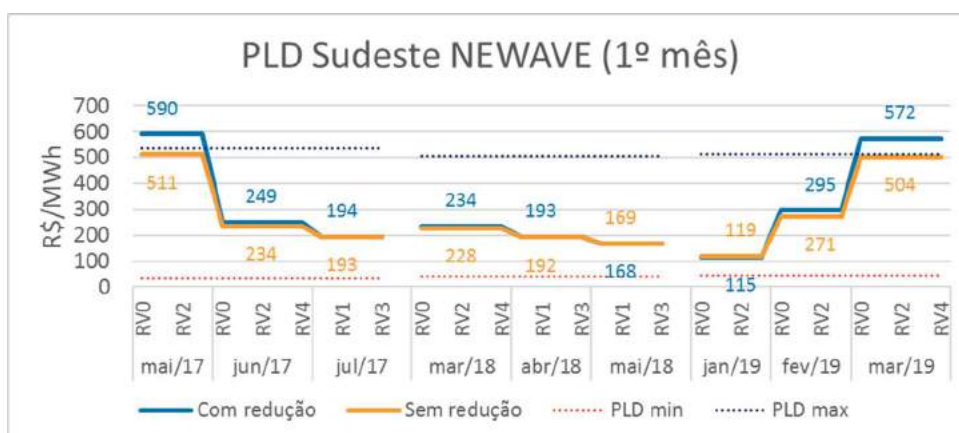


Figura 19 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para as rodadas encadeadas com e sem redução automática da ordem.

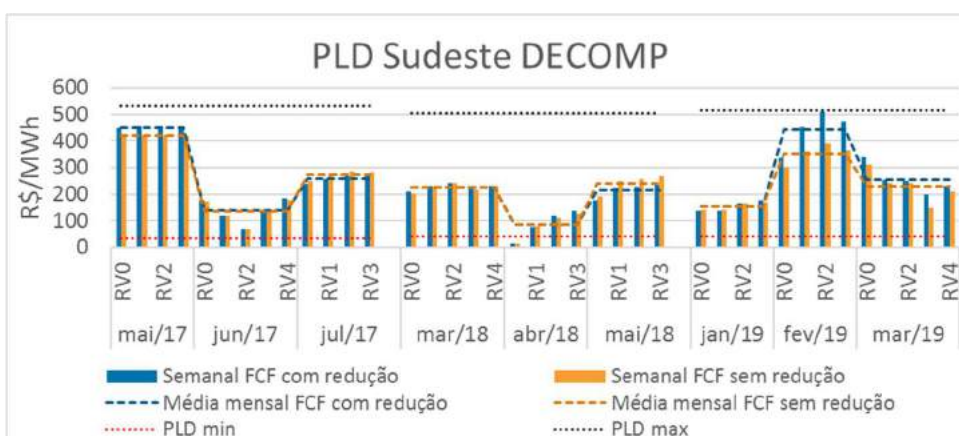


Figura 20 - Trajetórias de CMO/PLD do DECOMP para as rodadas encadeadas com e sem redução automática da ordem.

Na Figura 21 são apresentados, separadamente, os resultados da rodada com redução automática da ordem (NEWAVE com e sem redução da ordem e DECOMP sempre sem redução da ordem) e sem a referida redução (NEWAVE e DECOMP). Como se pode observar, especificamente no terceiro mês de cada trimestre, ocorre um descasamento entre o sentido da trajetória de CMO/PLD pelo NEWAVE e pelo DECOMP: enquanto, o CMO/PLD permanece em ascensão (em queda) no NEWAVE, ele passa a cair (ou subir) no DECOMP. Isso sugere que a previsão semanal de vazões que serve como dado de entrada para o DECOMP tenha maior influência na trajetória do CMO/PLD do que a Função de Custo Futuro construída com as séries sintéticas do NEWAVE.

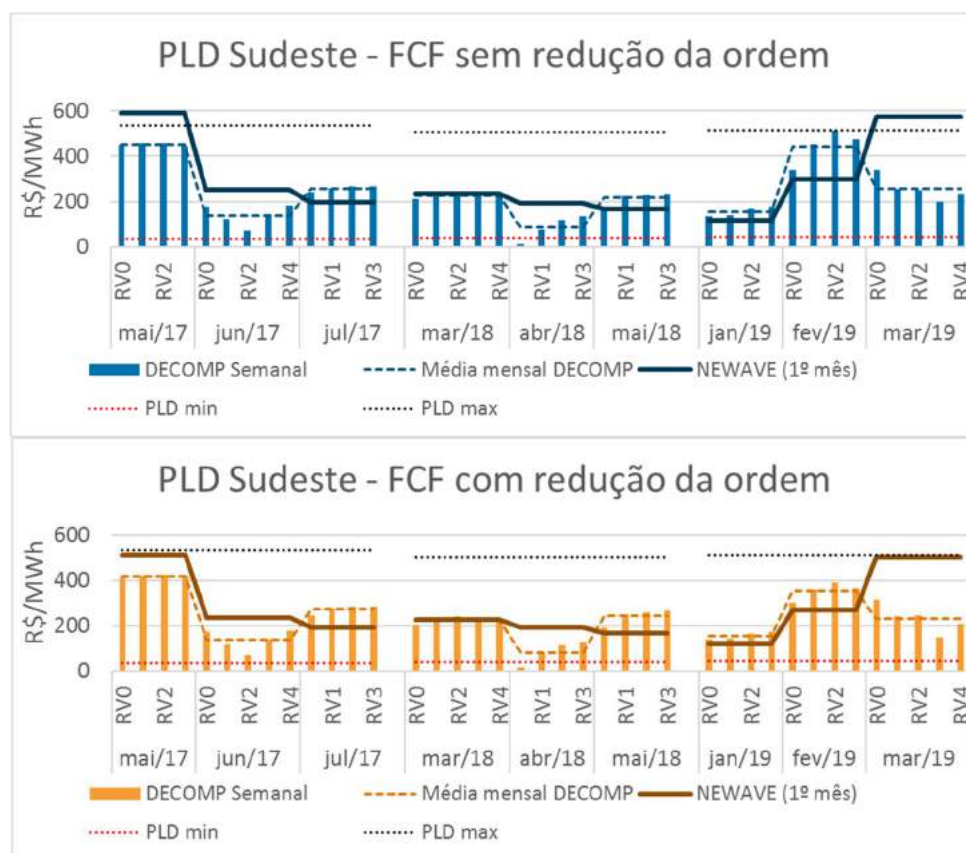


Figura 21 – Comparação das trajetórias de CMO/PLD com e sem redução automática da ordem do PAR(p).

Logo, não aplicar a verificação e redução da ordem do PAR(p) quando da ocorrência de cortes indesejáveis na FCF não apresenta potencial de redução da volatilidade do CMO/PLD. Quanto aos patamares de preço, especificamente, não se pode delinear uma tendência específica de queda ou de elevação no preço devido à aplicação ou não da redução da ordem.

Ademais, tal implementação não representa um aprimoramento metodológico, uma vez que levaria a abandonar um desenvolvimento que teve por objetivo evitar a ocorrência de cortes que foram considerados indesejados na FCF em 2001, de maneira que não se recomenda a sua implementação sem que, antes, se realizem análises mais aprofundadas em ciclos futuros.

## 5.2) Correlação espacial mensal

Na Figura 22 e na Figura 23 são mostradas as trajetórias de CMO/PLD do submercado Sudeste (sem mínimo e máximo), para as rodadas encadeadas com correlação espacial anual e mensal, do NEWAVE (saídas do primeiro mês do horizonte) e das respectivas revisões do DECOMP (média semanal, ponderada por patamar), para os mesmos trimestres anteriores. Os resultados para os demais submercados encontram-se em Anexo.

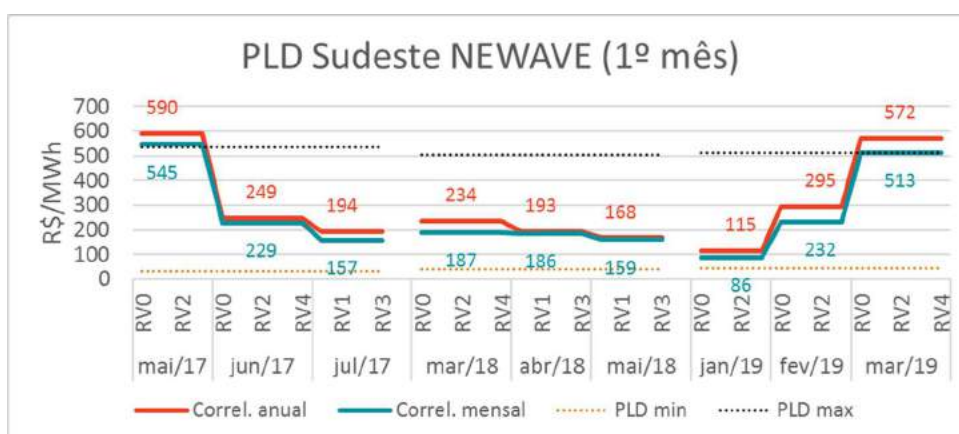


Figura 22 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para as rodadas encadeadas com correlação espacial anual e mensal.

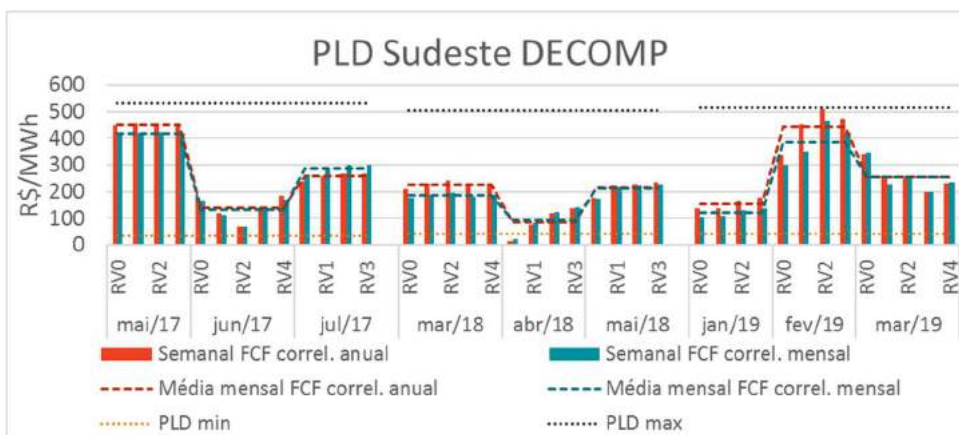


Figura 23 - Trajetórias de CMO/PLD do DECOMP para as rodadas encadeadas com correlação espacial anual e mensal.





### 5.3) Centroide + reamostragem dos cenários de afluições da *forward*

Conforme mencionado anteriormente, decidiu-se avaliar o impacto isolado do uso de centroide e reamostragem das afluições da *forward* no NEWAVE na trajetória de volatilidade do CMO/PLD, devido ao aprimoramento metodológico que ambos representam.

Na Figura 25 e na Figura 26 estão as trajetórias de CMO/PLD do Sudeste (sem piso e teto), para as rodadas encadeadas sem e com as implementações de centroide + reamostragem, do NEWAVE (saídas do primeiro mês) e das respectivas revisões do DECOMP (média semanal por patamar), para os mesmos trimestres anteriores. O tipo de reamostragem utilizada foi a plena, com passo 3 que, até o momento de realização das referidas rodadas, indicava ser a melhor metodologia para a reamostragem de cenários e varredura da árvore, em função do tempo computacional. Os resultados para os demais submercados encontram-se em Anexo.

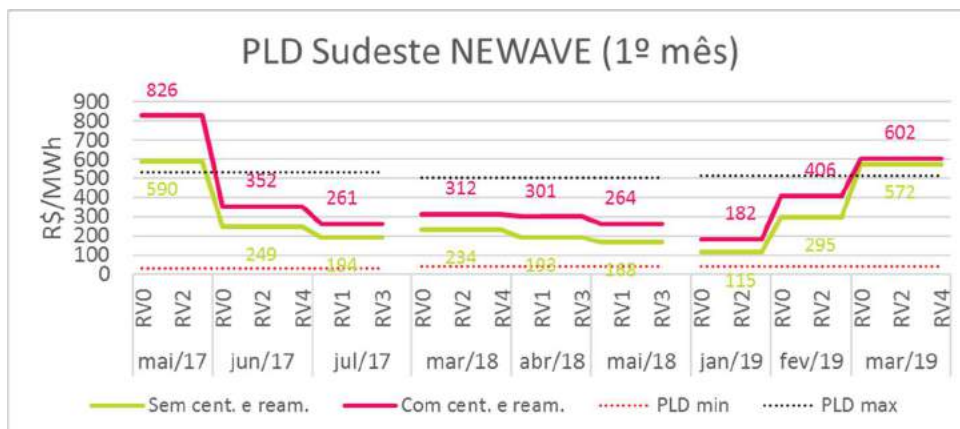


Figura 25 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para as rodadas encadeadas sem e com centroide + reamostragem plena passo 3.

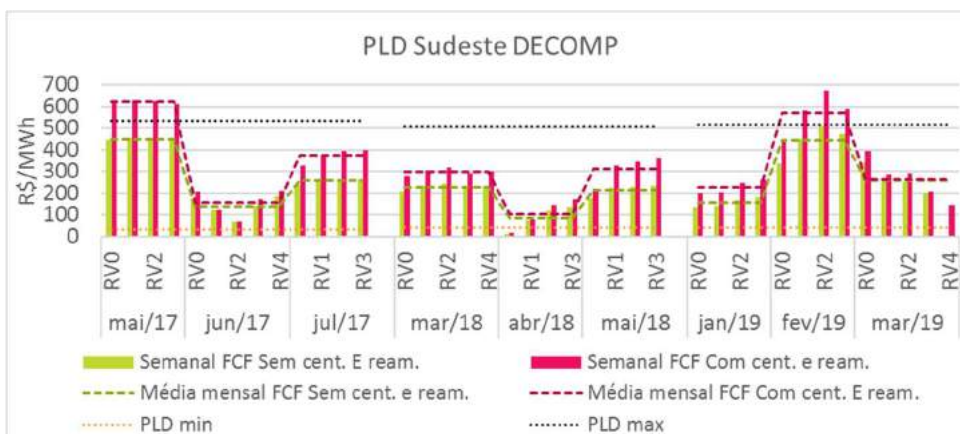


Figura 26 - Trajetórias de CMO/PLD do DECOMP para as rodadas encadeadas sem e com centroide + reamostragem plena passo 3.

Na Figura 27 são mostrados, separadamente, os resultados da rodada sem centroide + reamostragem (NEWAVE e DECOMP) e com centroide (NEWAVE e DECOMP) + reamostragem (NEWAVE). Assim como para os casos anteriores, no último mês dos trimestres ocorre um descasamento entre o sentido da trajetória de CMO/PLD pelo NEWAVE e pelo DECOMP: enquanto, o CMO/PLD permanece subindo (ou caindo) no NEWAVE, ele passa a cair (ou subir) no DECOMP. Isso novamente sugere que a previsão semanal de vazões teria maior influência na trajetória do CMO/PLD do que a FCF construída com as séries sintéticas do NEWAVE.

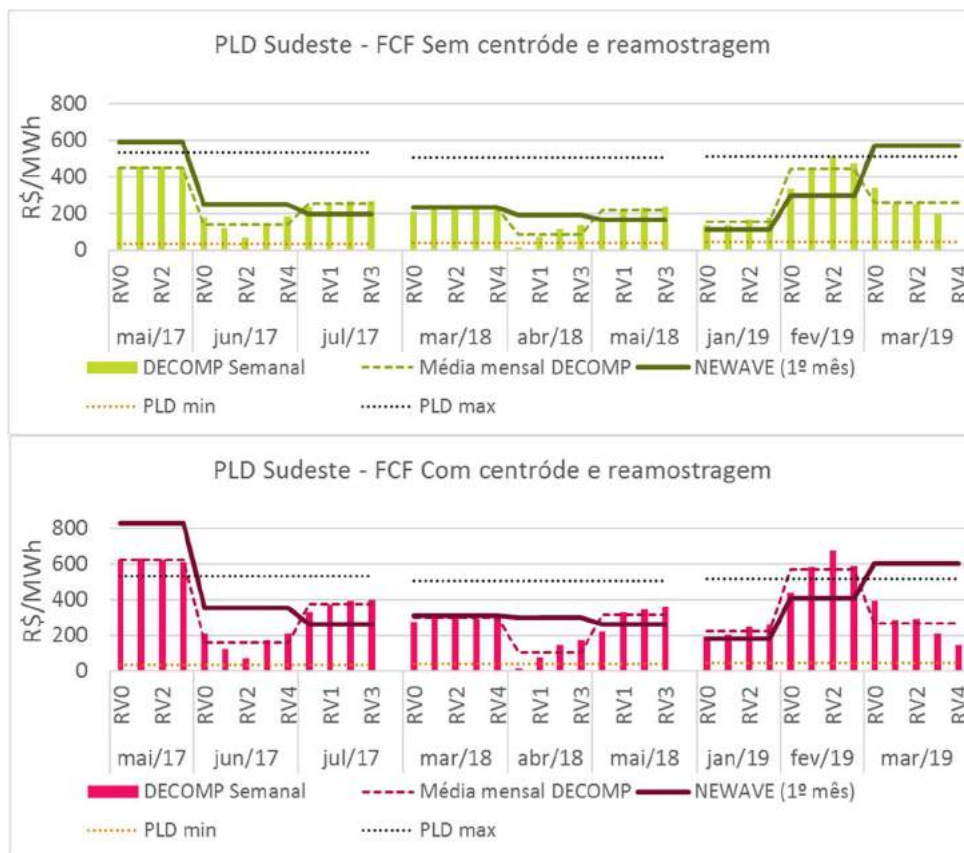


Figura 27 – Comparação das trajetórias de CMO/PLD sem e com centroide + reamostragem plena passo 3.

Apesar de impactarem no recobrimento da árvore de cenários e na agregação de ruídos, tendo impacto na variabilidade amostral das séries sintéticas de ENA do PAR(p), o centroide e a reamostragem não alteram a trajetória de volatilidade dos preços. Ocorre, no entanto, uma grande elevação dos patamares de CMO/PLD, conforme esperado devido à melhor construção da FCF por conta do maior número de cenários visitados



## 5.4) Centroide + reamostragem dos cenários de fluência da *forward* + correlação espacial mensal

Devido à melhoria metodológica representada pelo centroide e pela reamostragem dos cenários da *forward*, ambas as funcionalidades apresentam potencial para serem incorporadas ao NEWAVE. Realizou-se uma simulação que avaliasse os impactos combinados do uso de centroide + reamostragem com a correlação mensal na volatilidade do CMO/PLD, já que esta última, apesar de isoladamente não mitigar a volatilidade, também é um aprimoramento metodológico.

A Figura 28 e a Figura 29 mostram as trajetórias de CMO/PLD do SE para as rodadas sem e com centroide + reamostragem e com correlação espacial anual, e com centroide + reamostragem e correlação espacial mensal, do NEWAVE (primeiro mês) e a média semanal por patamar das revisões do DECOMP, para os trimestres anteriores. A reamostragem utilizada é a plena passo 3. Os resultados dos demais submercados estão em Anexo.

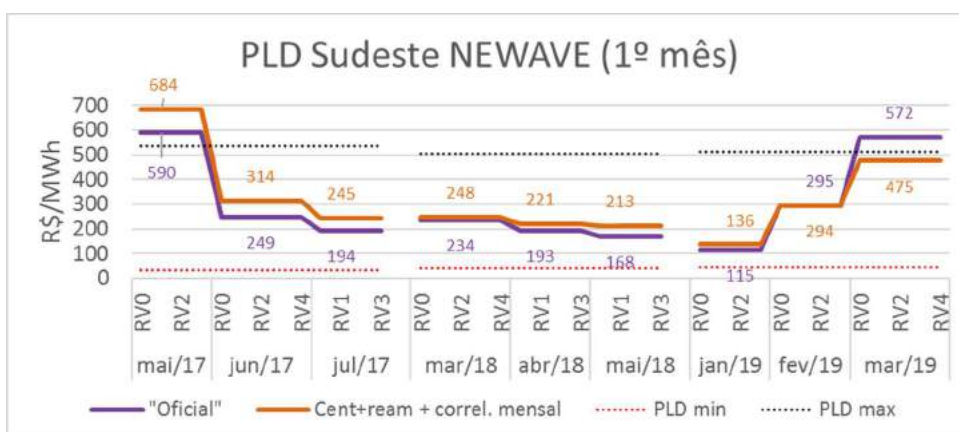


Figura 28 – Trajetórias de CMO/PLD (NW) para rodadas encadeadas sem centr. + ream. e com correl. espacial anual e com centr. + ream. e correl. espacial mensal.

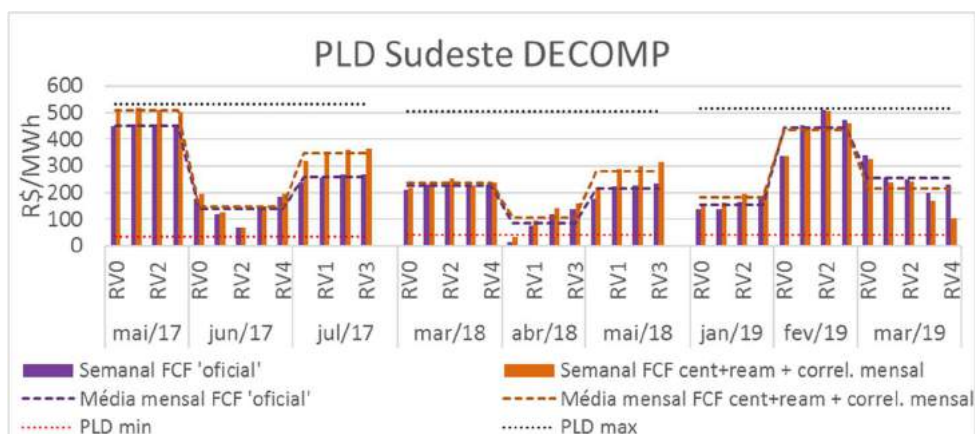


Figura 29 - Trajetórias de CMO/PLD (DC) para rodadas encadeadas sem centr. + ream. e com correl. espacial anual e com centr. + ream. e correl. espacial mensal.

Na Figura 30 são mostrados, separadamente, os resultados da rodada com correlação espacial anual (NEWAVE e DECOMP) e mensal (NEWAVE e DECOMP). Novamente nota-se que a previsão semanal de vazões tem mais influência na volatilidade do CMO/PLD do que a FCF do NEWAVE, uma vez que os preços do NEWAVE e do DECOMP podem seguir trajetórias diferentes.

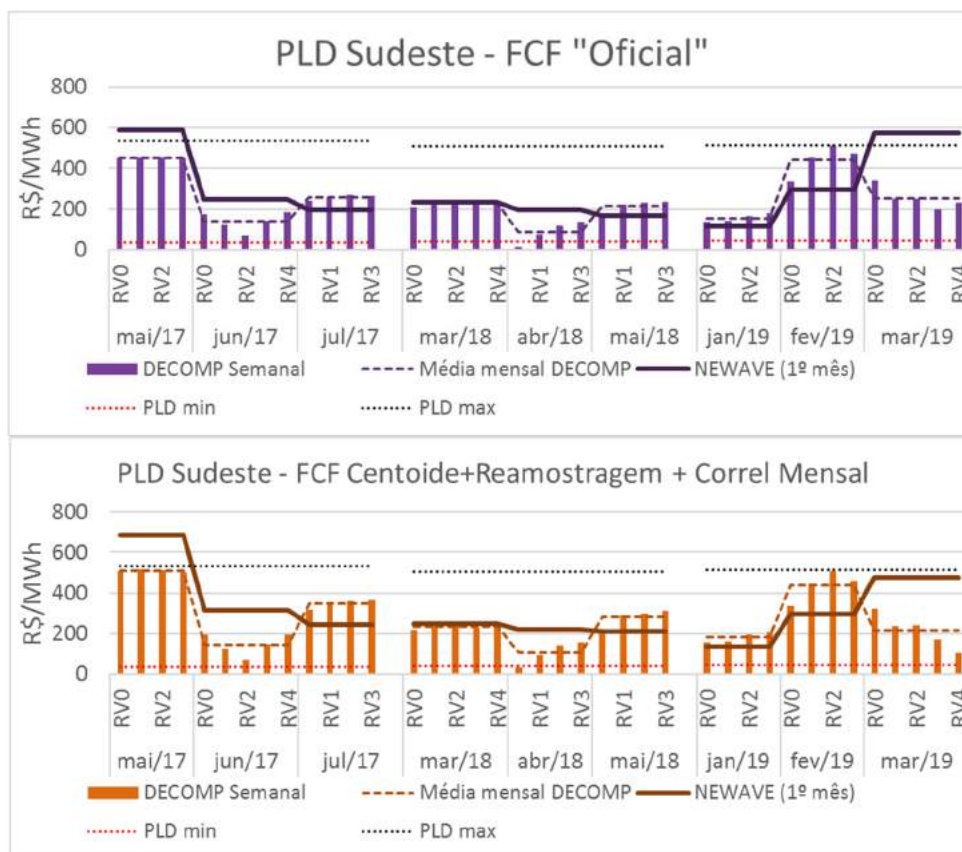


Figura 30 –Trajetórias de CMO/PLD sem centroide + reamostragem e com correlação espacial anual e com centroide + reamostragem e correlação espacial mensal.

De forma a complementar as análises dos efeitos da introdução da correlação espacial mensal, foram feitas simulações a partir do caso base para cálculo de garantias físicas e ICB do Leilão de Energia Nova (LEN) A-4/2019, os principais resultados constam na Figura 31 e Figura 32

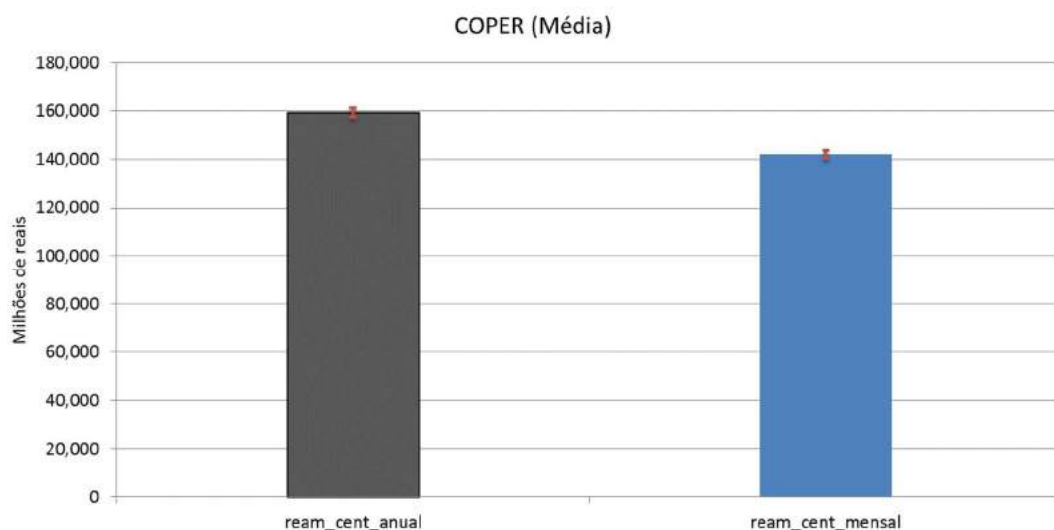


Figura 31 – Comparação de custos de operação considerando as implementações de reamostragem e centroide e duas alternativas de correlação espacial: anual e mensal

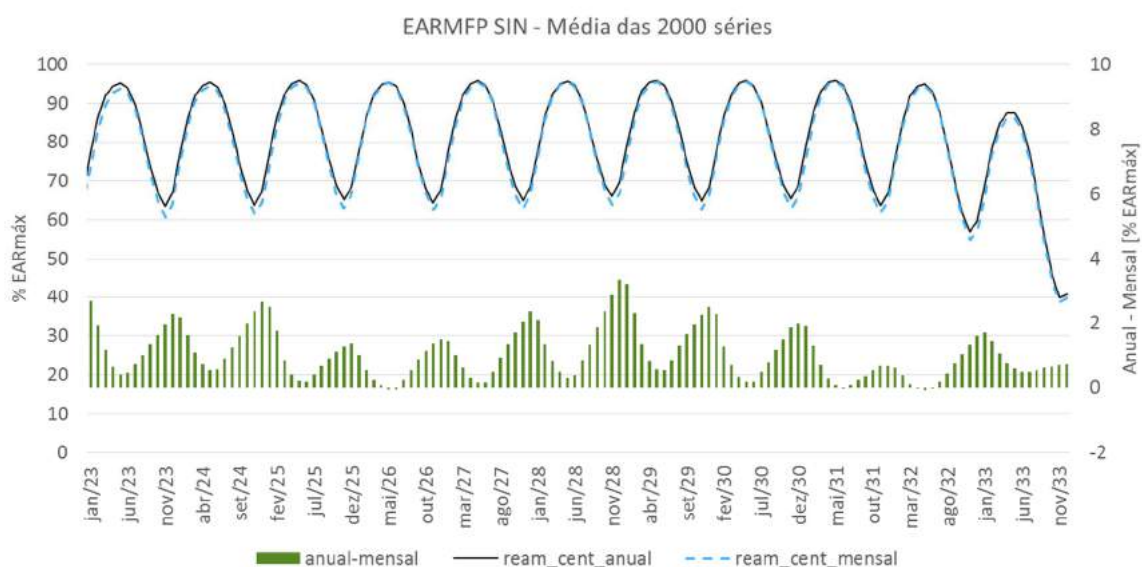


Figura 32 – Comparação de energia armazenada considerando as implementações de reamostragem e centroide e duas alternativas de correlação espacial: anual e mensal

De maneira geral, a consideração da correlação espacial mensal apresentou pouca influência nos resultados de custo de operação e energia armazenada, com tendência para redução de custos e gestão de recursos hídricos mais otimista, devido principalmente ao aumento da diversidade hidrológica decorrente da correlação espacial mensal.

Como se observa, o efeito combinado de ambas as implementações metodológicas também não é capaz de alterar a trajetória de volatilidade do CMO/PLD. Além disso, nota-se uma tendência, em muitos meses, da correlação espacial mensal reaproximar os patamares de preços do caso oficial que o uso do centroide e a reamostragem tendem a elevar.

Como o centroide e a reamostragem impactam na variabilidade amostral dos cenários de ENAs sintéticas geradas, foi realizada uma análise complementar para verificar a aderência das ENAs geradas para a política energética em quatro possíveis combinações de uso das implementações, para a rodada do deck de PLD de janeiro/2019: com correlação espacial anual, com correlação espacial mensal, com correlação espacial anual + centroide + reamostragem e com correlação espacial mensal + centroide + reamostragem. Para isso, quatro métricas estatísticas de distribuições foram comparadas para dois estágios específicos do histórico (maio, representativo do período seco, e dezembro, do período úmido para muitos dos REEs do SIN) e das quatro rodadas anteriores (sendo considerado apenas o período pós-estudo, não condicionado à tendência hidrológica). As métricas foram: média, desvio-padrão, curtose (medida do “achatamento” da curva da função de distribuição de probabilidade - Figura 33) e assimetria (medida da assimetria da função de distribuição de probabilidade em torno da média - Figura 34) (14).

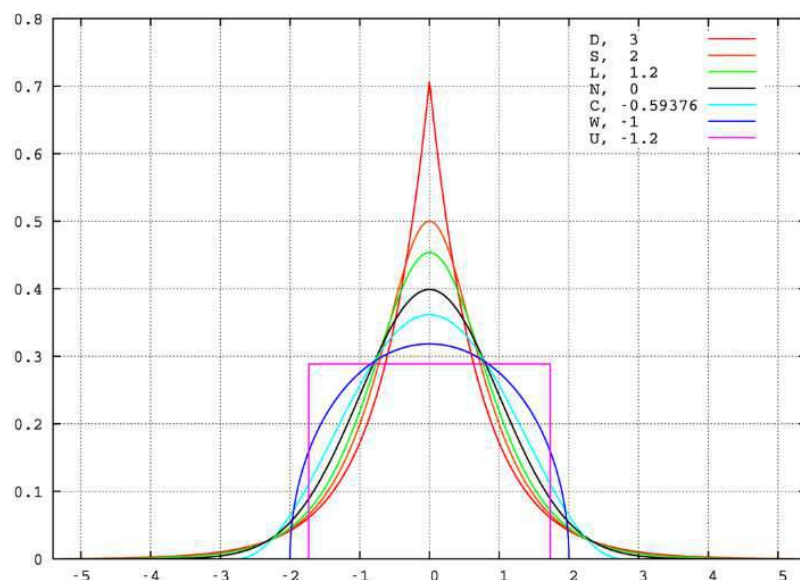


Figura 33 – Representação gráfica da curtose de curvas da função distribuição de probabilidade: quanto mais “achatada” a curva, mais negativa a curtose.

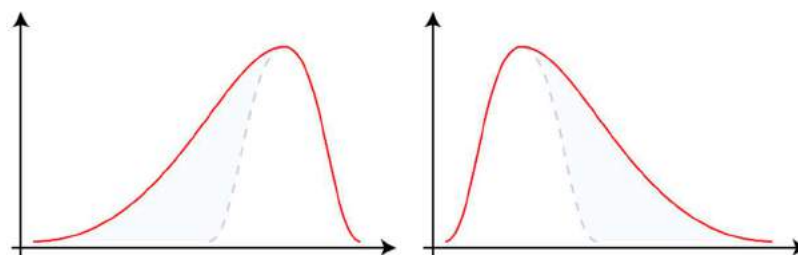


Figura 34 – Representação gráfica da assimetria da curva da função de distribuição de probabilidade: assimetria negativa (esquerda) e positiva (direita).

Os resultados estão resumidos, para alguns REEs, na Tabela 2 e na Tabela 3. Para cada métrica, o caso mais aderente ao histórico está destacado em cinza.

Tabela 2 – Aderência das métricas estatísticas de distribuição das quatro rodadas ao histórico para o mês de maio.

| REE: Paraná - Mês: Maio - Período: Pós-estudo   |          |               |            |         |
|-------------------------------------------------|----------|---------------|------------|---------|
| Caso                                            | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                       | 18732,41 | 4516,91       | 0,76       | 1,74    |
| Correlação anual                                | 18834,16 | 4571,06       | 0,34       | 0,04    |
| Correlação mensal                               | 18755,80 | 4552,49       | 0,33       | -0,01   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem     | 18747,74 | 4493,10       | 0,33       | -0,03   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem    | 18703,03 | 4496,88       | 0,31       | -0,06   |
| REE: Nordeste - Mês: Maio - Período: Pós-estudo |          |               |            |         |
| Caso                                            | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                       | 7102,34  | 3622,16       | 2,23       | 8,33    |
| Correlação anual                                | 6894,53  | 3512,49       | 0,50       | -0,12   |
| Correlação mensal                               | 6929,26  | 3559,17       | 0,54       | -0,01   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem     | 6977,36  | 3561,48       | 0,49       | -0,15   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem    | 6992,36  | 3561,48       | 0,50       | -0,09   |
| REE: Norte - Mês: Maio - Período: Pós-estudo    |          |               |            |         |
| Caso                                            | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                       | 9270,88  | 3047,97       | 0,91       | 0,85    |
| Correlação anual                                | 8987,14  | 2937,70       | 0,37       | -0,05   |
| Correlação mensal                               | 9200,38  | 2976,05       | 0,37       | -0,03   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem     | 9009,14  | 2996,67       | 0,31       | -0,20   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem    | 9228,16  | 3033,93       | 0,29       | -0,23   |
| REE: Sul - Mês: Maio - Período: Pós-estudo      |          |               |            |         |
| Caso                                            | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                       | 4510,43  | 3614,99       | 1,18       | 1,04    |
| Correlação anual                                | 4487,13  | 3541,69       | 1,41       | 2,07    |
| Correlação mensal                               | 4344,82  | 3426,17       | 1,31       | 1,59    |
| Correlação anual + centróide + reamostragem     | 4192,89  | 3377,28       | 1,47       | 2,27    |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem    | 4136,94  | 3314,46       | 1,42       | 2,20    |
| REE: Itaipu - Mês: Maio - Período: Pós-estudo   |          |               |            |         |
| Caso                                            | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                       | 3508,32  | 1863,08       | 1,37       | 3,26    |
| Correlação anual                                | 3734,40  | 1877,42       | 0,60       | -0,07   |
| Correlação mensal                               | 3735,14  | 1873,72       | 0,61       | -0,03   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem     | 3605,34  | 1762,90       | 0,49       | -0,22   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem    | 3601,19  | 1759,11       | 0,49       | -0,24   |



Tabela 3 – Aderência das métricas estatísticas de distribuição das quatro rodadas ao histórico para o mês de dezembro.

| REE: Paraná - Mês: Dezembro - Período: Pós-estudo   |          |               |            |         |
|-----------------------------------------------------|----------|---------------|------------|---------|
| Caso                                                | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                           | 26429,12 | 7825,52       | 0,72       | 0,93    |
| Correlação anual                                    | 26564,47 | 7999,45       | 0,40       | -0,02   |
| Correlação mensal                                   | 26579,75 | 7945,21       | 0,35       | -0,15   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem         | 26273,40 | 7672,98       | 0,33       | -0,20   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem        | 26352,04 | 7705,01       | 0,32       | -0,22   |
| REE: Nordeste - Mês: Dezembro - Período: Pós-estudo |          |               |            |         |
| Caso                                                | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                           | 9985,06  | 3763,77       | 0,47       | -0,21   |
| Correlação anual                                    | 9940,84  | 3809,25       | 0,55       | 0,15    |
| Correlação mensal                                   | 10002,23 | 3802,15       | 0,43       | -0,10   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem         | 9721,82  | 3515,71       | 0,33       | -0,32   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem        | 9836,26  | 3515,42       | 0,32       | -0,28   |
| REE: Norte - Mês: Dezembro - Período: Pós-estudo    |          |               |            |         |
| Caso                                                | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                           | 5544,08  | 2309,44       | 1,11       | 1,27    |
| Correlação anual                                    | 5566,08  | 2277,71       | 0,51       | 0,23    |
| Correlação mensal                                   | 5623,73  | 2369,91       | 0,48       | -0,03   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem         | 5512,30  | 2271,68       | 0,40       | -0,26   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem        | 5504,26  | 2219,57       | 0,30       | -0,36   |
| REE: Sul - Mês: Dezembro - Período: Pós-estudo      |          |               |            |         |
| Caso                                                | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                           | 3580,67  | 2284,75       | 1,12       | 0,61    |
| Correlação anual                                    | 3642,99  | 2444,82       | 1,88       | 5,14    |
| Correlação mensal                                   | 3556,73  | 2195,41       | 1,41       | 2,80    |
| Correlação anual + centróide + reamostragem         | 3613,80  | 2248,75       | 1,48       | 2,89    |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem        | 3611,26  | 2218,47       | 1,36       | 2,28    |
| REE: Itaipu - Mês: Dezembro - Período: Pós-estudo   |          |               |            |         |
| Caso                                                | Média    | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose |
| Histórico                                           | 3046,02  | 1890,26       | 1,43       | 4,22    |
| Correlação anual                                    | 3108,26  | 1779,80       | 0,54       | -0,17   |
| Correlação mensal                                   | 3108,66  | 1792,05       | 0,58       | -0,09   |
| Correlação anual + centróide + reamostragem         | 3154,55  | 1754,59       | 0,45       | -0,29   |
| Correlação mensal + centróide + reamostragem        | 3162,85  | 1771,07       | 0,46       | -0,33   |

Notadamente, não é possível apontar uma tendência de prevalência de uma das rodadas como a mais aderente para todas as métricas, REEs e estágios.

Os mesmos resultados utilizados para gerar as tabelas acima foram utilizados para gerar gráficos de dispersão bivariada de ENA entre pares de REEs. Os resultados para os REEs Paraná e Nordeste estão mostrados na Figura 35 e na Figura 36, para os mesmos 5 anos do período pós-estudo nos estágios de maio e dezembro e para o histórico.



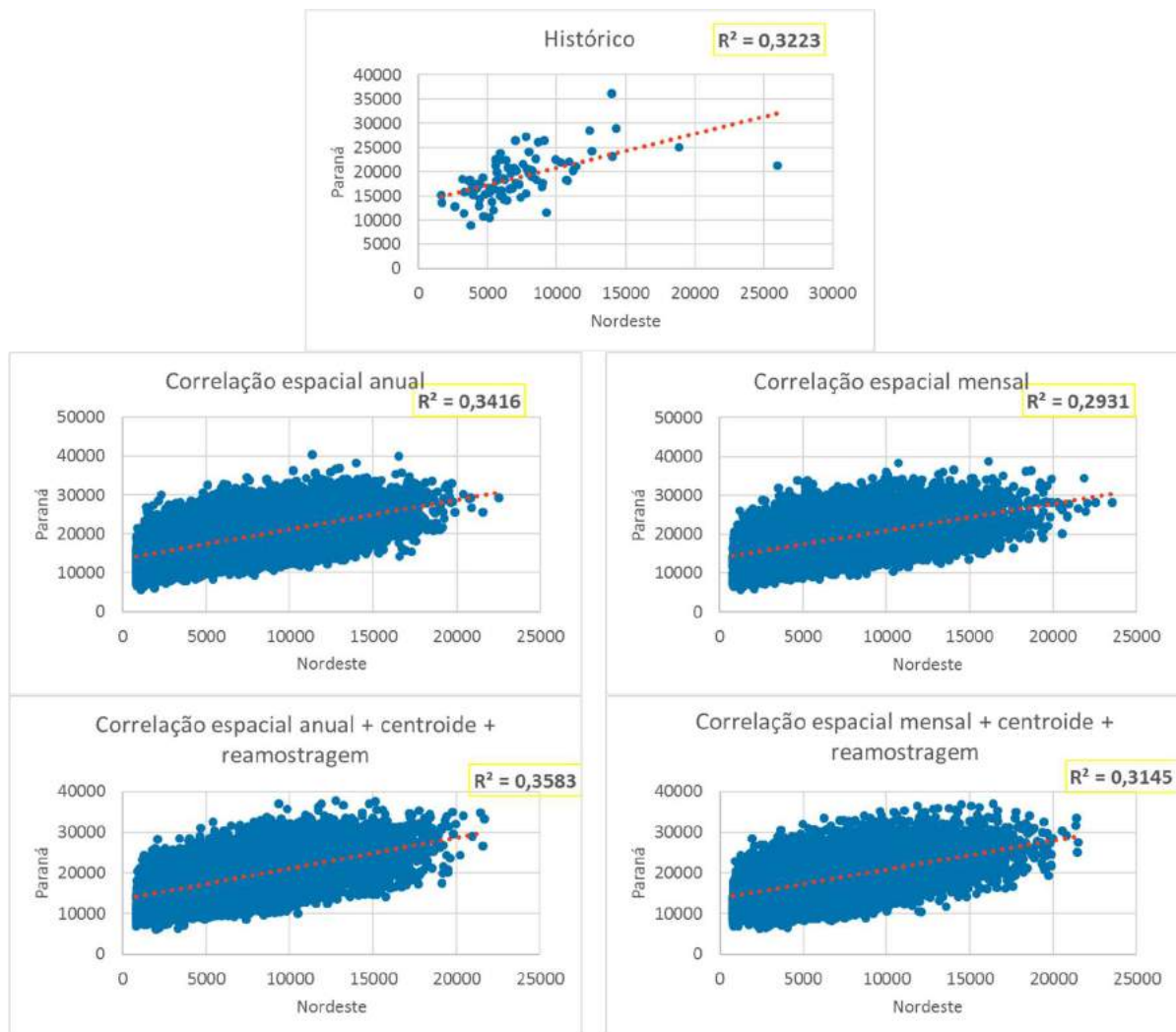


Figura 35 - Dispersão das ENAs dos REEs Paraná e Nordeste para o histórico e as quatro rodadas para o mês de maio.

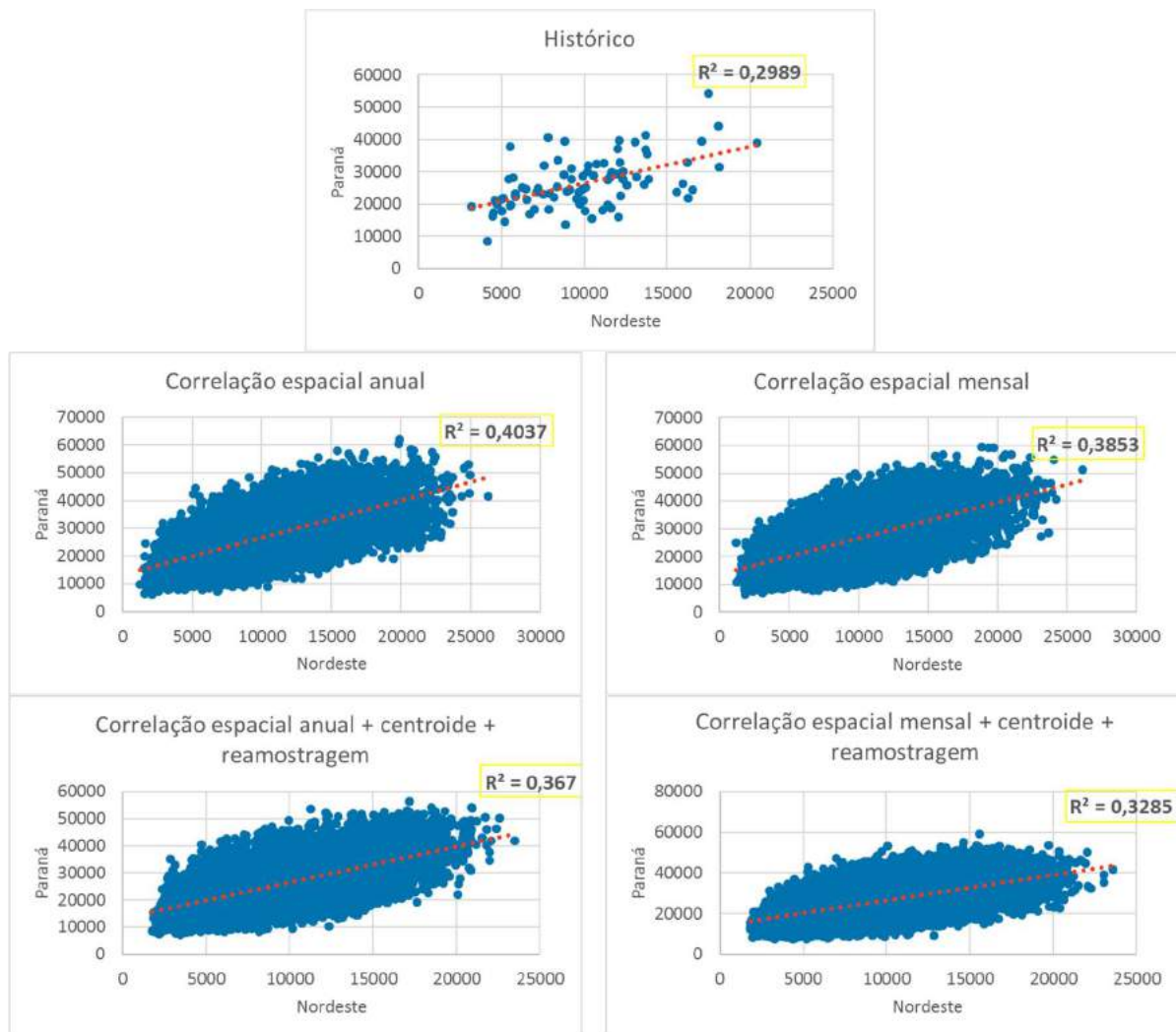


Figura 36 - Dispersão das ENAs dos REEs Paraná e Nordeste para o histórico e as quatro rodadas para o mês de dezembro.

A Tabela 4 e a Tabela 5 a seguir resumem as correlações espaciais entre o REE Paraná e os demais REEs, para os meses de maio e dezembro, no histórico e no período pós-estudo dos quatro casos anteriores. A correlação corresponde à raiz quadrada de  $R^2$ . Como se pode ver, as rodadas que utilizam correlação espacial mensal (seja com centroide e reamostragem ou sem) tendem a apresentar correlação espacial mais próxima àquela calculada com base no histórico, mostrando maior aderência à realidade.

Tabela 4 – Correlações espaciais mensais entre o REE Paraná e os demais REEs para o histórico e os demais casos rodados – mês de maio.

| <b>Correlação espacial REE Paraná x</b> | <b>Histórico</b> | <b>Correlação espacial anual</b> | <b>Correlação espacial mensal</b> | <b>Correlação espacial anual + centroide + reamostragem</b> | <b>Correlação espacial mensal + centroide + reamostragem</b> |
|-----------------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Nordeste</b>                         | 0,5677           | 0,5845                           | 0,5414                            | 0,5986                                                      | 0,5608                                                       |
| <b>Norte</b>                            | 0,4083           | 0,3732                           | 0,4200                            | 0,3991                                                      | 0,4231                                                       |
| <b>Madeira</b>                          | 0,2423           | 0,2105                           | 0,1323                            | 0,2022                                                      | 0,1212                                                       |
| <b>Sudeste</b>                          | 0,7152           | 0,5925                           | 0,6179                            | 0,6124                                                      | 0,6396                                                       |
| <b>Sul</b>                              | 0,0539           | 0,2280                           | 0,0173                            | 0,1616                                                      | 0,0678                                                       |
| <b>Belo Monte</b>                       | 0,1273           | 0,0812                           | 0,1054                            | 0,1068                                                      | 0,1319                                                       |
| <b>Iguaçu</b>                           | 0,1960           | 0,2502                           | 0,1127                            | 0,0800                                                      | 0,0648                                                       |
| <b>Itaipu</b>                           | 0,2966           | 0,2791                           | 0,2102                            | 0,2383                                                      | 0,1738                                                       |
| <b>Paranapanema</b>                     | 0,3603           | 0,3153                           | 0,2789                            | 0,3038                                                      | 0,2698                                                       |
| <b>Teles Pires</b>                      | 0,2296           | 0,1905                           | 0,2474                            | 0,1936                                                      | 0,2551                                                       |
| <b>Man-AP</b>                           | 0,2352           | 0,1428                           | 0,1609                            | 0,2771                                                      | 0,1982                                                       |

Tabela 5 – Correlações espaciais mensais entre o REE Paraná e os demais REEs para o histórico e os demais casos rodados – mês de dezembro.

| <b>Correlação espacial REE Paraná x</b> | <b>Histórico</b> | <b>Correlação espacial anual</b> | <b>Correlação espacial mensal</b> | <b>Correlação espacial anual + centroide + reamostragem</b> | <b>Correlação espacial mensal + centroide + reamostragem</b> |
|-----------------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Nordeste</b>                         | 0,5467           | 0,6353                           | 0,6207                            | 0,6058                                                      | 0,5731                                                       |
| <b>Norte</b>                            | 0,3066           | 0,4180                           | 0,3464                            | 0,3863                                                      | 0,2837                                                       |
| <b>Madeira</b>                          | 0,0849           | 0,1637                           | 0,1221                            | 0,1371                                                      | 0,0959                                                       |
| <b>Sudeste</b>                          | 0,5228           | 0,6449                           | 0,5912                            | 0,6166                                                      | 0,5355                                                       |
| <b>Sul</b>                              | 0,0002           | 0,1794                           | 0,0435                            | 0,1828                                                      | 0,0686                                                       |
| <b>Belo Monte</b>                       | 0,2629           | 0,1685                           | 0,2326                            | 0,1432                                                      | 0,2032                                                       |
| <b>Iguaçu</b>                           | 0,0837           | 0,2748                           | 0,1400                            | 0,1304                                                      | 0,1783                                                       |
| <b>Itaipu</b>                           | 0,0866           | 0,2792                           | 0,2261                            | 0,2766                                                      | 0,2326                                                       |
| <b>Paranapanema</b>                     | 0,2970           | 0,3618                           | 0,3059                            | 0,3756                                                      | 0,3540                                                       |
| <b>Teles Pires</b>                      | 0,1631           | 0,2071                           | 0,1792                            | 0,1565                                                      | 0,1015                                                       |
| <b>Man-AP</b>                           | 0,1783           | 0,1897                           | 0,1936                            | 0,2356                                                      | 0,1897                                                       |

Na correlação espacial mensal entre os REEs Paraná e Nordeste (os dois com maior MLT), por exemplo, ao se passar de correlação espacial em base anual para mensal, o valor da correlação entre ambos diminui (isso ocorreu nos dois meses observados: maio e dezembro). Ou seja, estando menos correlacionados, passa-se a ter uma maior complementariedade temporal de ENA entre os dois, diminuindo a ocorrência de séries com concomitância de estiagem. Isso explica a queda do CMO/PLD observada nos casos rodados com correlação espacial mensal. Esses resultados também podem ser observados em (15).

Ainda nessa linha de raciocínio, realizaram-se duas rodadas encadeadas adicionais de NEWAVE e DECOMP, para o trimestre jan-fev-mar/2019: uma com correlação espacial mensal no NEWAVE e também no DECOMP (GEVAZP versão 7.1), e outra com correlação espacial mensal no NEWAVE e no DECOMP, reamostragem no NEWAVE e centroide no NEWAVE e no DECOMP (GEVAZP versão 7.1).

As trajetórias de CMO/PLD resultantes do NEWAVE e do DECOMP são mostradas, respectivamente, na Figura 37 e na Figura 38. Conforme esperado, ao se utilizar correlação espacial mensal também no DECOMP, observa-se maior redução do CMO/PLD, e, ao se utilizar centroide também no DECOMP, observa-se maior elevação do CMO/PLD.

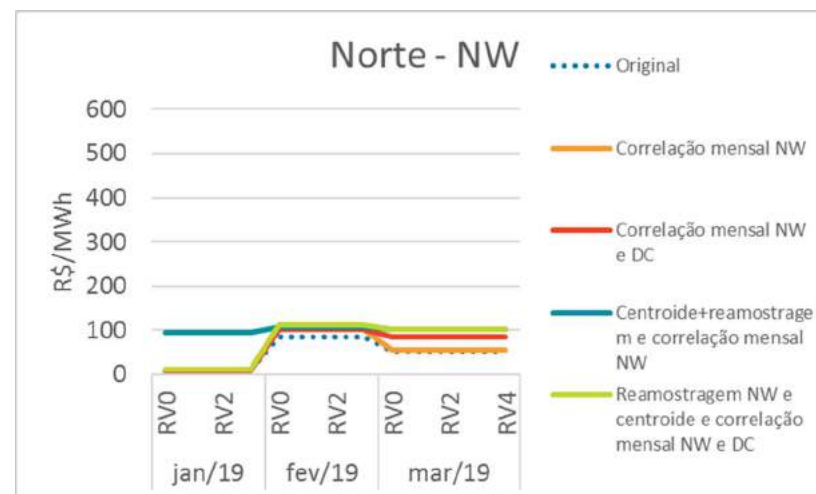
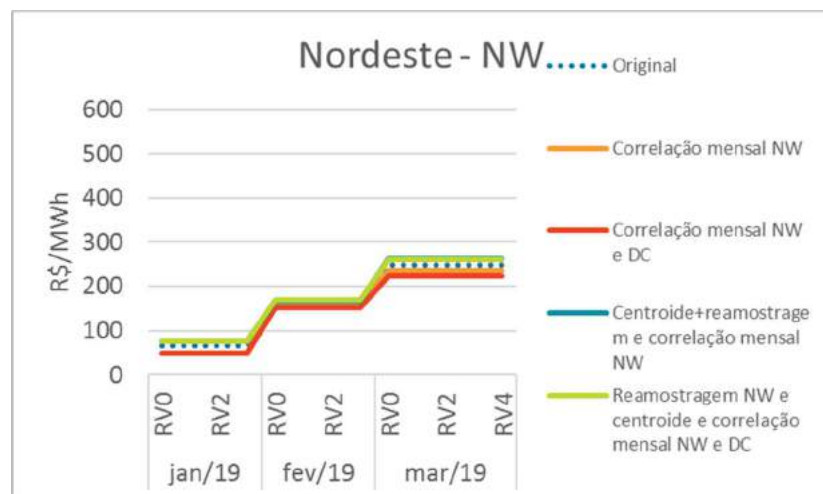
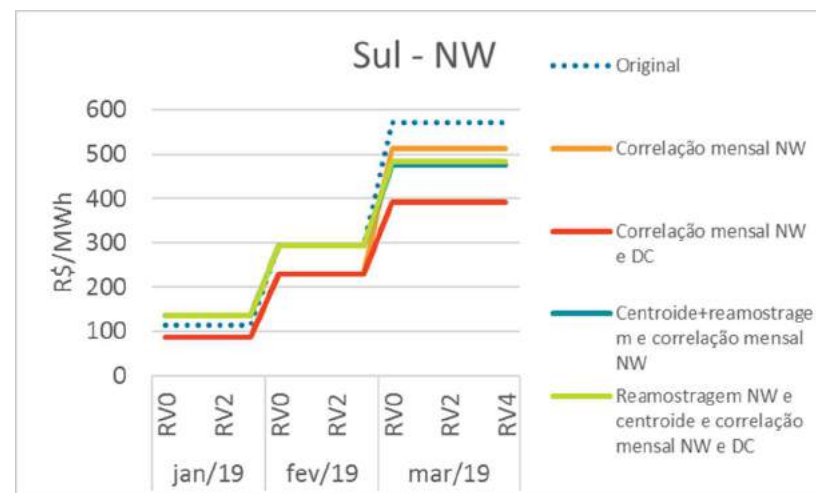
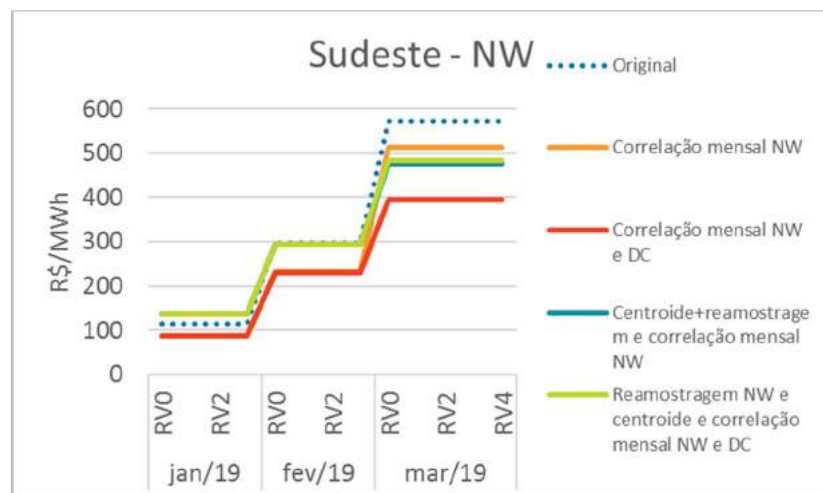


Figura 37 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para o trimestre jan-fev-mar/2019 com diversas combinações de centroe e correlação espacial mensal no NEWAVE e no DECOMP (GEVAZP).



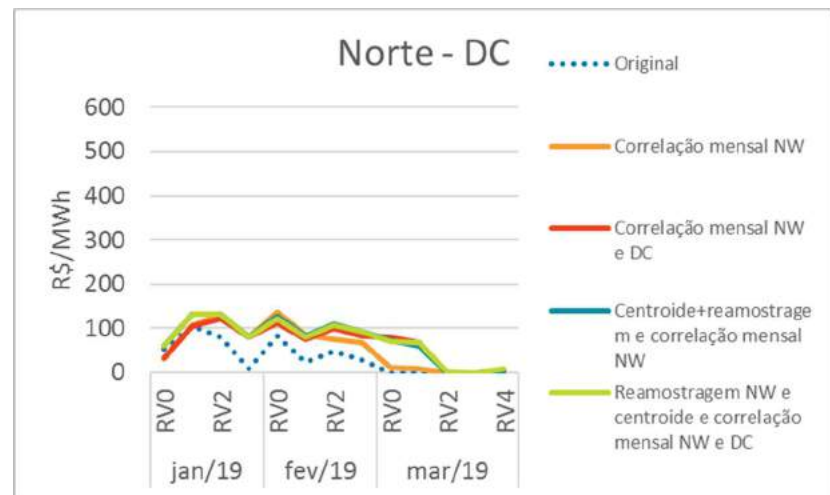
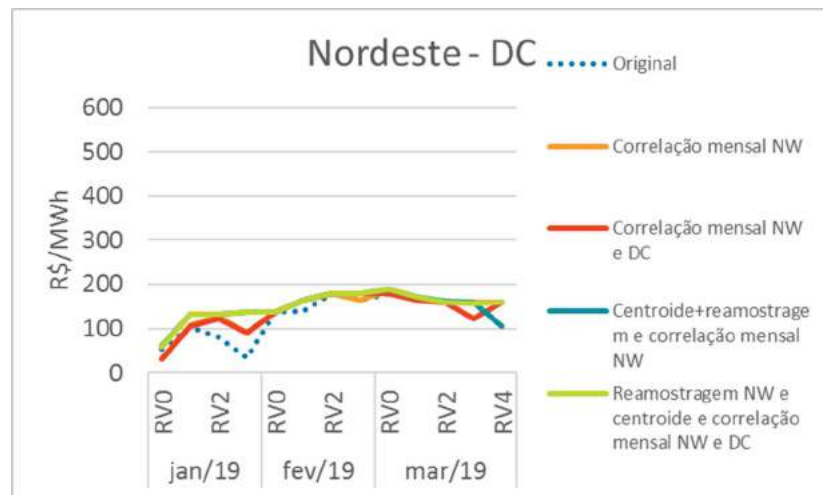
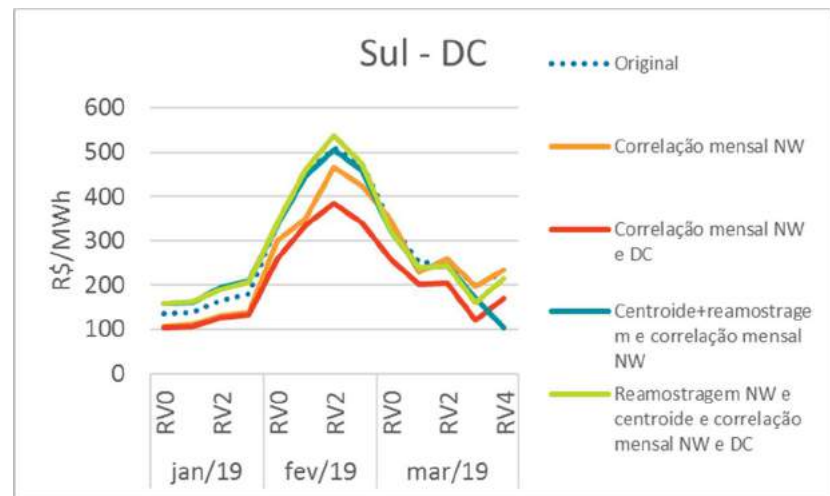
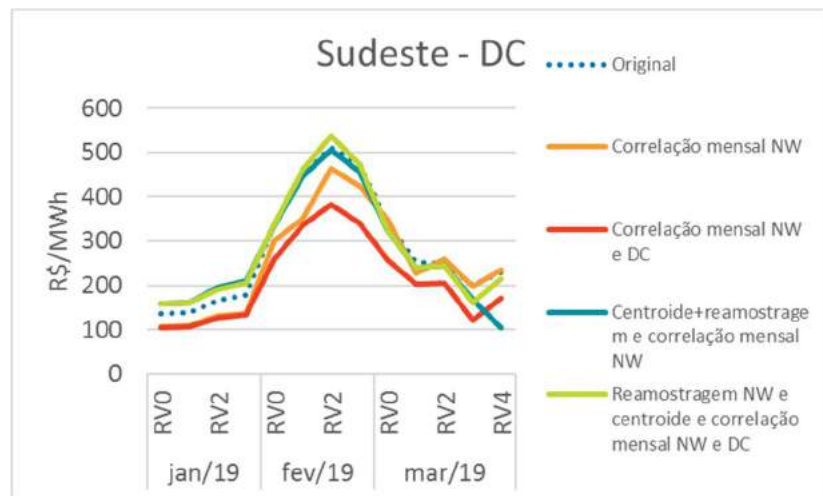


Figura 38 – Trajetórias de CMO/PLD do DECOMP para o trimestre jan-fev-mar/2019 com diversas combinações de centroide e correlação espacial mensal no NEWAVE e no DECOMP (GEVAZP).

Como resultados complementares, são mostrados abaixo os custos totais de operação e de geração térmica (do NEWAVE de cada mês) para as cinco rodadas analisadas. Percebe-se que os resultados estão condizentes com o comportamento dos patamares de CMO/PLD apresentados anteriormente.

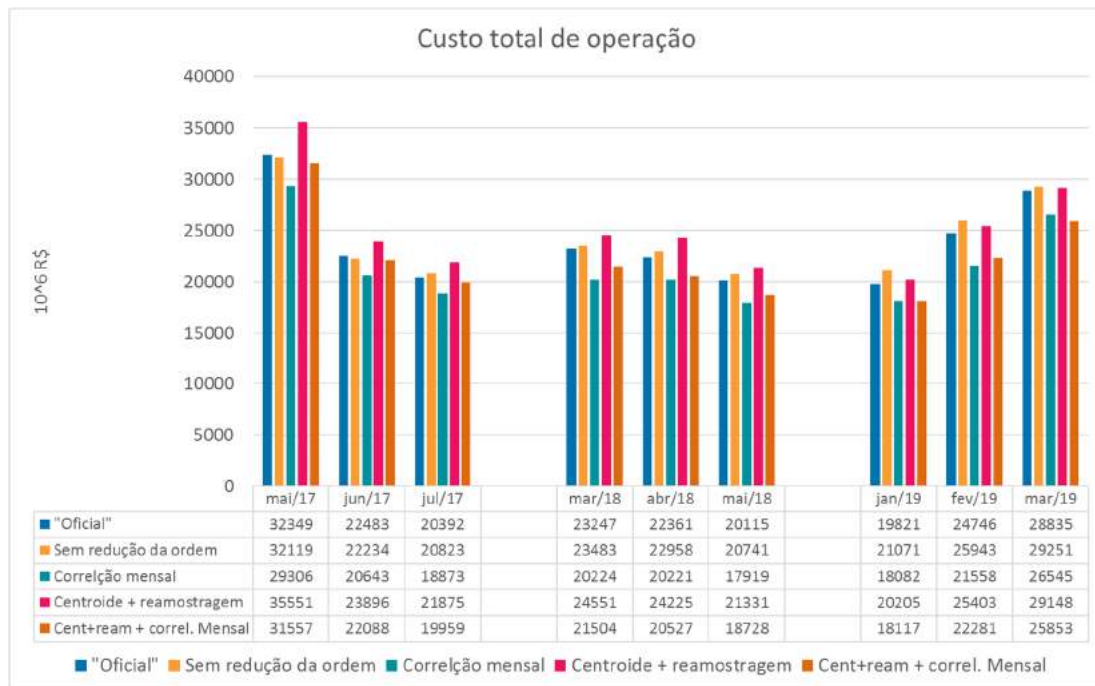


Figura 39 – Custos totais de operação (NEWAVE).

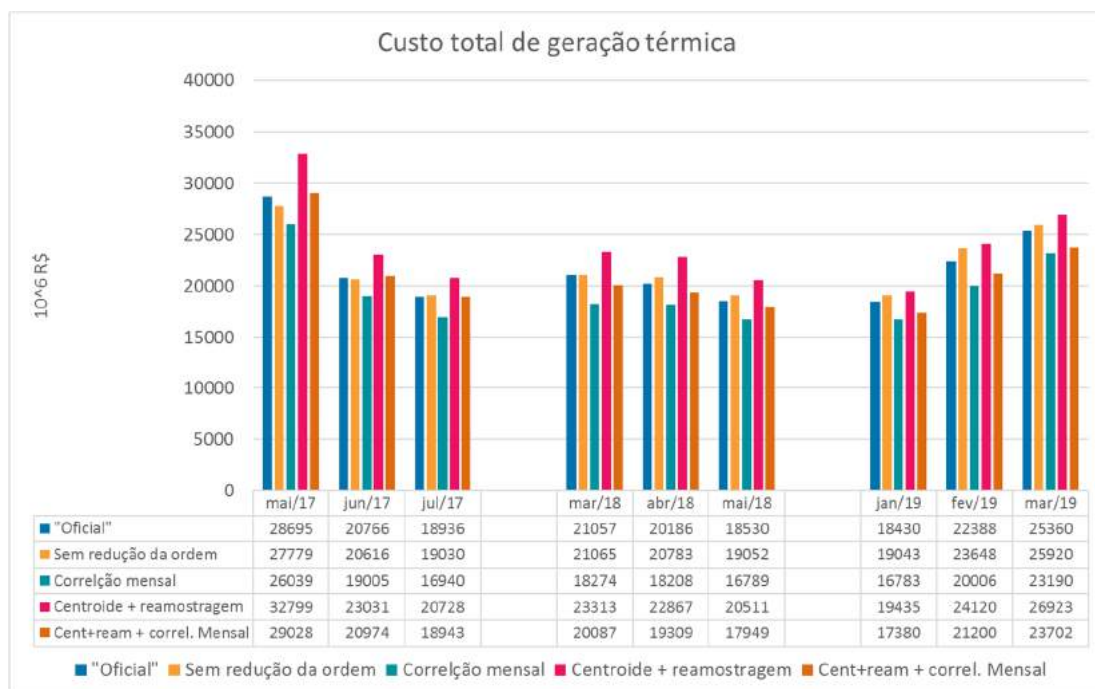


Figura 40 – Custos totais de geração térmica (NEWAVE) para as rodadas realizadas.

## 6) Conclusões e recomendações

No ciclo 2018-2019 da CPAMP foram analisadas, dentro do Subgrupo Volatilidade, duas metodologias candidatas à mitigação da volatilidade do CMO/PLD: 1) suspensão da redução automática da ordem do modelo PAR(p) quando da ocorrência de coeficientes negativos que podem levar a cortes positivos considerados indesejáveis na Função de Custo Futuro, e 2) utilização de correlação espacial de ENAs entre REEs em base mensal, em substituição à anual.

Conforme os resultados indicaram, nenhuma das duas metodologias apresenta potencial de mitigação da volatilidade. Quanto à não redução automática da ordem, dado que tal implementação representaria a suspensão de um aprimoramento criado para evitar a ocorrência de cortes indesejáveis na FCF, não se considerou prosseguir com o encaminhamento de se utilizar tal metodologia a partir de 2020, sendo necessários estudos e análises complementares no próximo ciclo, juntamente com investigações de outros critérios para a seleção da ordem do modelo e de aprimoramentos no modelo PAR(p) como um todo.

Quanto à utilização de correlação espacial mensal, mesmo não apresentando melhorias na volatilidade do CMO/PLD, tal implementação representa um aprimoramento ao modelo estocástico para a geração de cenários de afluências, tornando-o mais representativo da realidade, dado que mais um dado de entrada passa a ser discretizado em base mensal, em um modelo dividido em estágios mensais. Sendo assim, recomenda-se a sua implementação oficial nos modelos NEWAVE e GEVAZP a partir de janeiro de 2020.

Como possíveis aprimoramentos para mitigação da volatilidade a serem investigados no ciclo 2019-2020, permanecem:

- Aprofundamento das análises referentes à não redução da ordem do PAR(p);
- Investigação de metodologias alternativas para a seleção da ordem do modelo;
- Aprimoramentos metodológicos no modelo de geração de cenários PAR(p);
- Consideração do modelo chuva-vazão no primeiro mês operativo;
- Possibilidade de inclusão da previsão de precipitação assim como outras variáveis climáticas que possam agregar informação ao processo de geração de cenários de afluências;

- Abertura do DECOMP em cenários estocásticos a partir da segunda semana do horizonte;
- Aumento do horizonte do DECOMP;
- Desacoplamento do GEVAZP do NEWAVE, permitindo o uso de outros modelos para geração de cenários.

## 7) Referências

1. **CEPEL.** *Modelo de Previsão de Vazões Semanais Afluentes aos Aproveitamentos Hidroelétricos do Sistema Brasileiro. Manual de Referência.* Rio de Janeiro : CEPEL, 2015.
2. *Short/Mid-Term Hydrothermal Dispatch and Spot Pricing for Large-Scale Systems - the Case of Brazil.* **Diniz, A. L., et al.** Dublin : 20th Power Systems Computation Conference, 2018.
3. **Penna, D. J. D., et al.** *Modelo de Geração de Séries Sintéticas de Energias e Vazões Manual de Referência.* Rio de Janeiro : CEPEL, 2016.
4. **Maceira, M.E.P., 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.* Dublin : 20th PSCC – Power Systems Computation Conference, 2018.
5. **ONS.** *ONS NT 143/2010 - Grupo de Estudos de Volatilidade do CMO/PLD da CPAMP - Relatório Técnico.* Rio de Janeiro : ONS, 2011.
6. —. *Procedimentos de Rede: Submódulo 23.4 - Diretrizes e critérios para estudos energéticos.* Rio de Janeiro : ONS, 2016.
7. **CEPEL.** *Manual de Referência - Modelo NEWAVE.* Rio de Janeiro : CEPEL, 2018.
8. **Kotz, S. e Johnson, N. L.** Introduction to Akaike (1973) information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *Breakthroughs in Statistics I.* 1992.
9. **Konishi, S. e Kitagawa, G.** *Information criteria and statistical modeling.* s.l. : Springer, 2008.
10. **Hannan, E. J, e Quinn, B. G.** The Determination of the order of an autoregression. *Journal of the Royal Statistical Society.* 1979, Vol. 41, B.
11. **Linde, A. van der.** DIC in variable selection. *Statistica Neerlandica.* 2005.
12. **Penna, D. D. J., Treistman, F. e Maceira, M. E. P.** *Avaliação de alternativas para escolha do representante no processo de agregação da Amostragem Seletiva.* Rio de Janeiro : CEPEL, 2018.
13. **Maceira, M. E. P., et al.** *Técnicas de Reamostragem de Cenários Hidrológicos para a simulação forward da PDDE na Definição da Estratégia de Operação Energética de Longo/Médio Prazo.* Rio de Janeiro : CEPEL, 2018.
14. **Joanes, D. N. e Gill, C. A.** Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician).* 1, 2002, Vol. 47.
15. **CEPEL.** *Avaliação da utilização da correlação espacial mensal na geração de cenários sintéticos de aflúncias e seus impactos na determinação da política ótima de operação de médio prazo.* Rio de Janeiro : CEPEL, 2019.

## Anexo

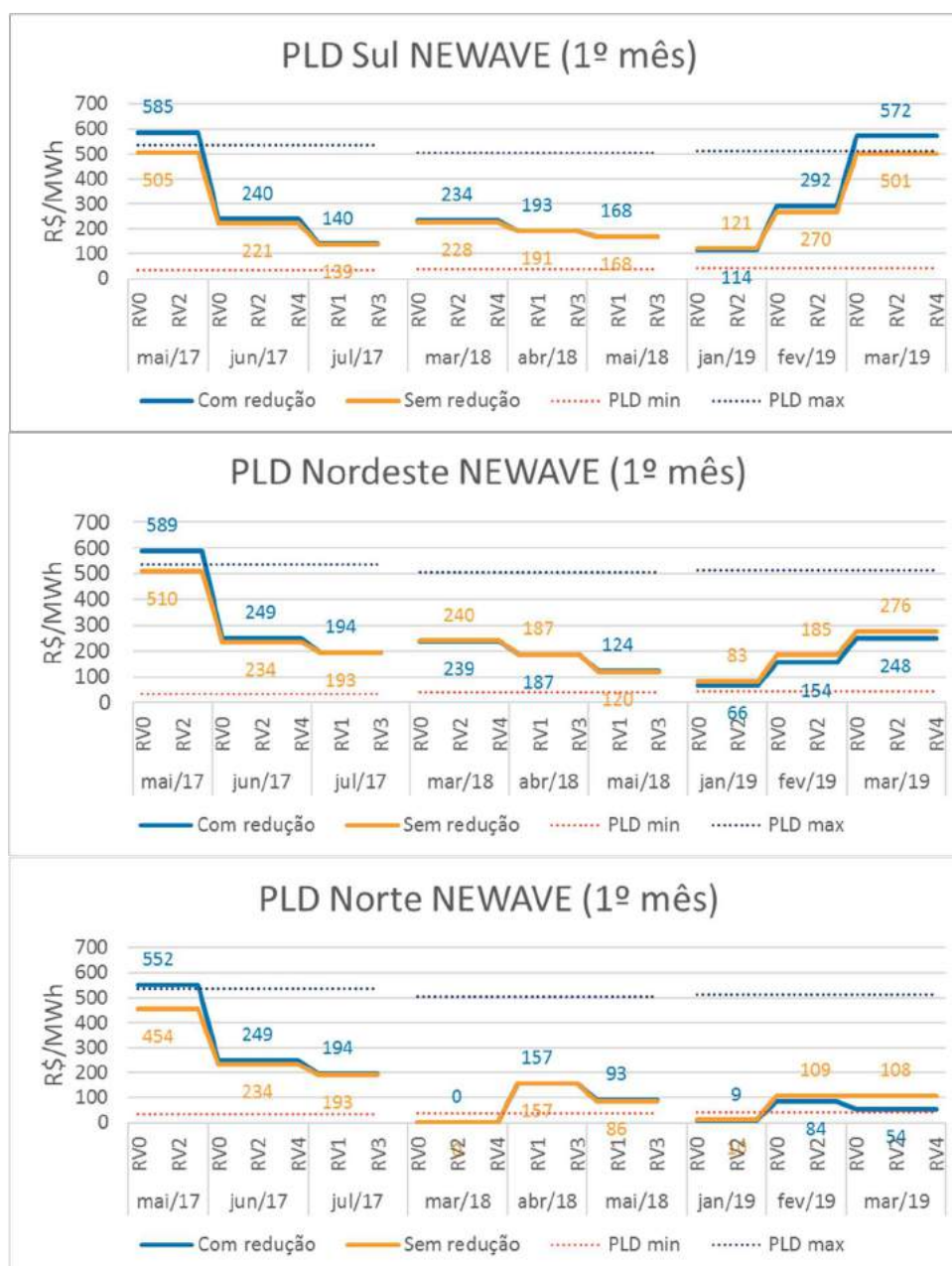


Figura 41 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para as rodadas encadeadas com e sem redução automática da ordem – submercados S, NE e N.



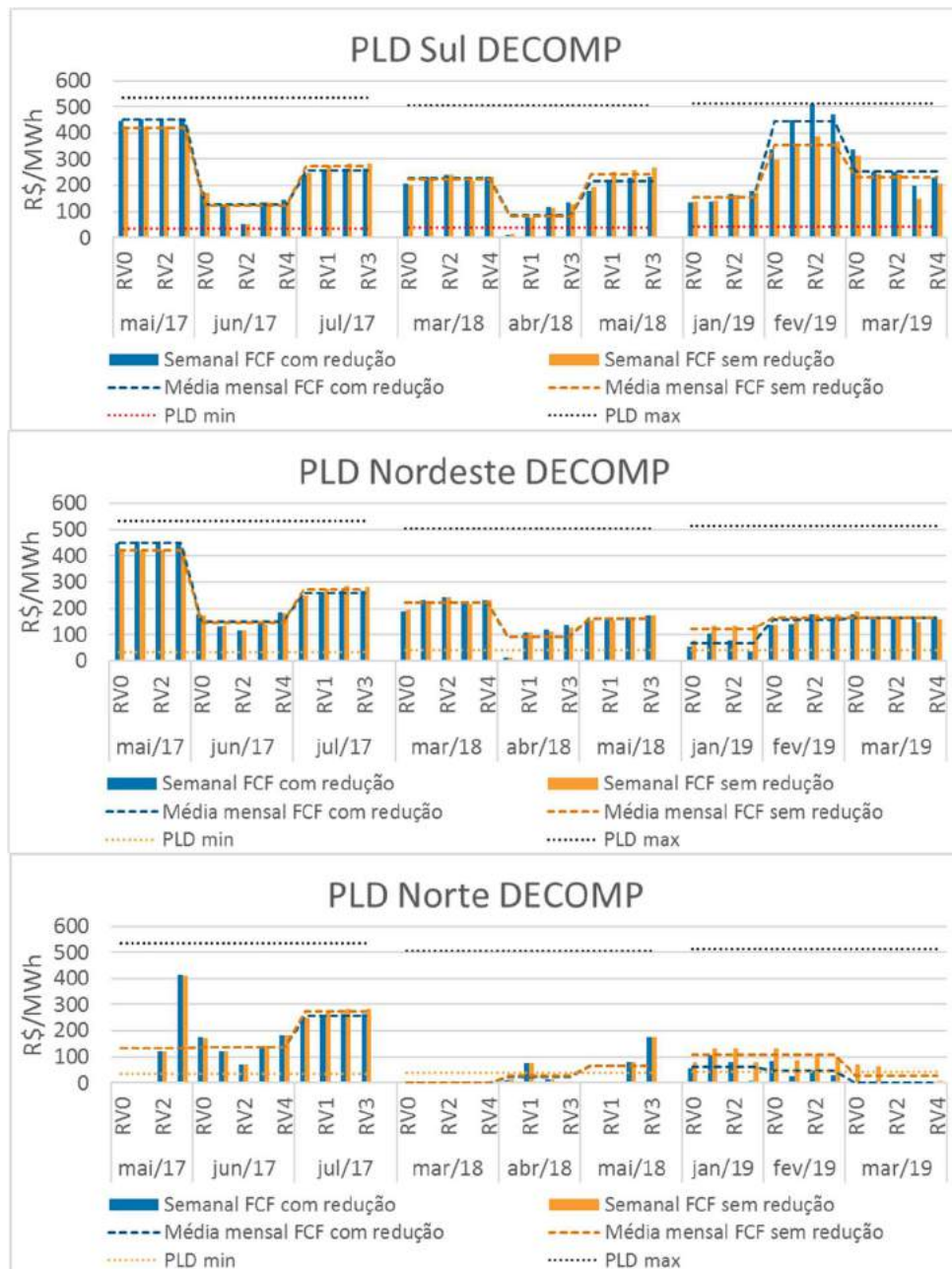


Figura 42 - Trajetórias de CMO/PLD do DECOMP para as rodadas encadeadas com e sem redução automática da ordem – submercados S, NE e N.

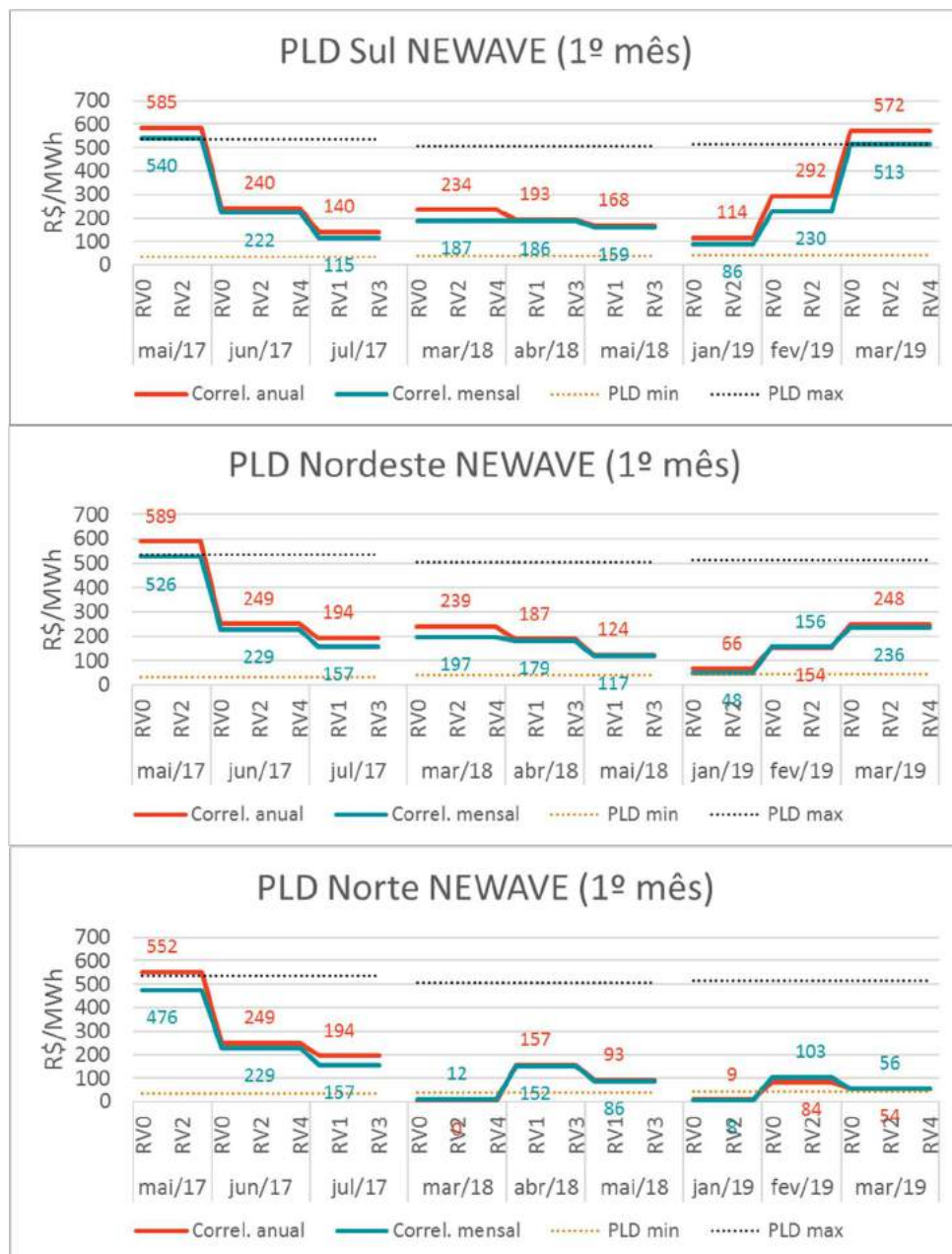


Figura 43 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para as rodadas encadeadas com correlação espacial anual e mensal – submercados S, NE e N.

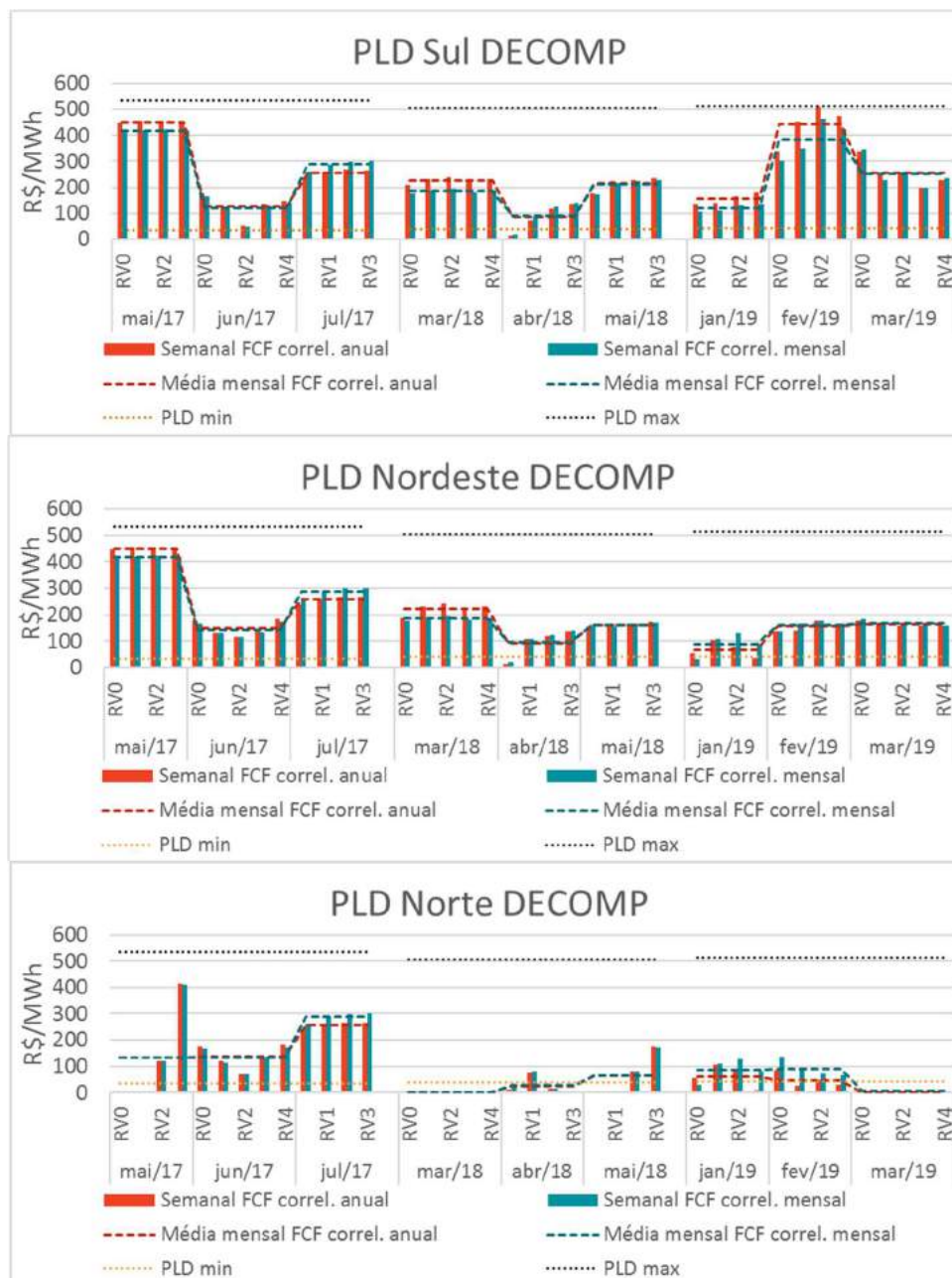


Figura 44 - Trajetórias de CMO/PLD do DECOMP para as rodadas encadeadas com correlação espacial anual e mensal – submercados S, NE e N.

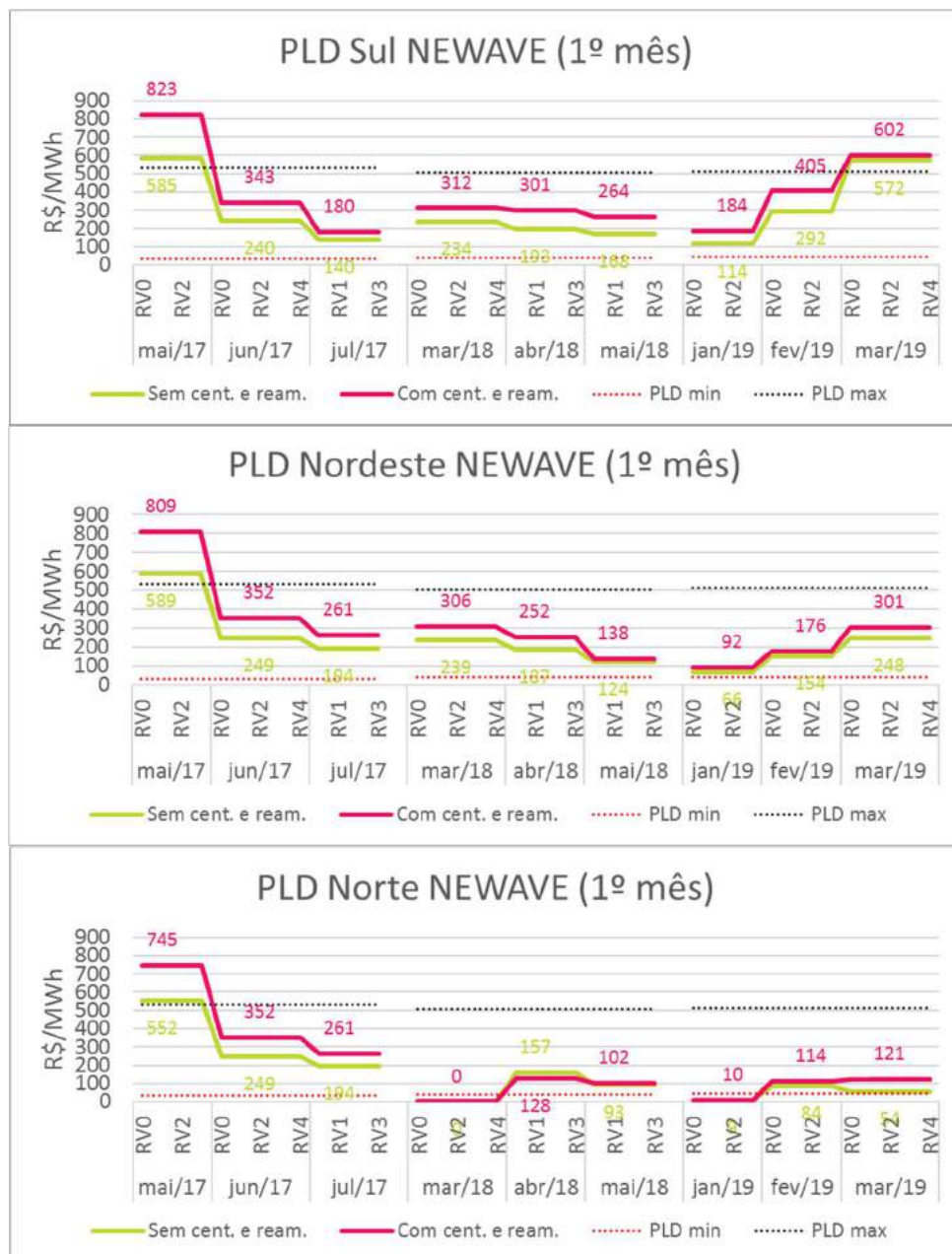


Figura 45 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para as rodadas encadeadas sem e com centroide + reamostragem plena passo 3 – submercados S, NE e N.



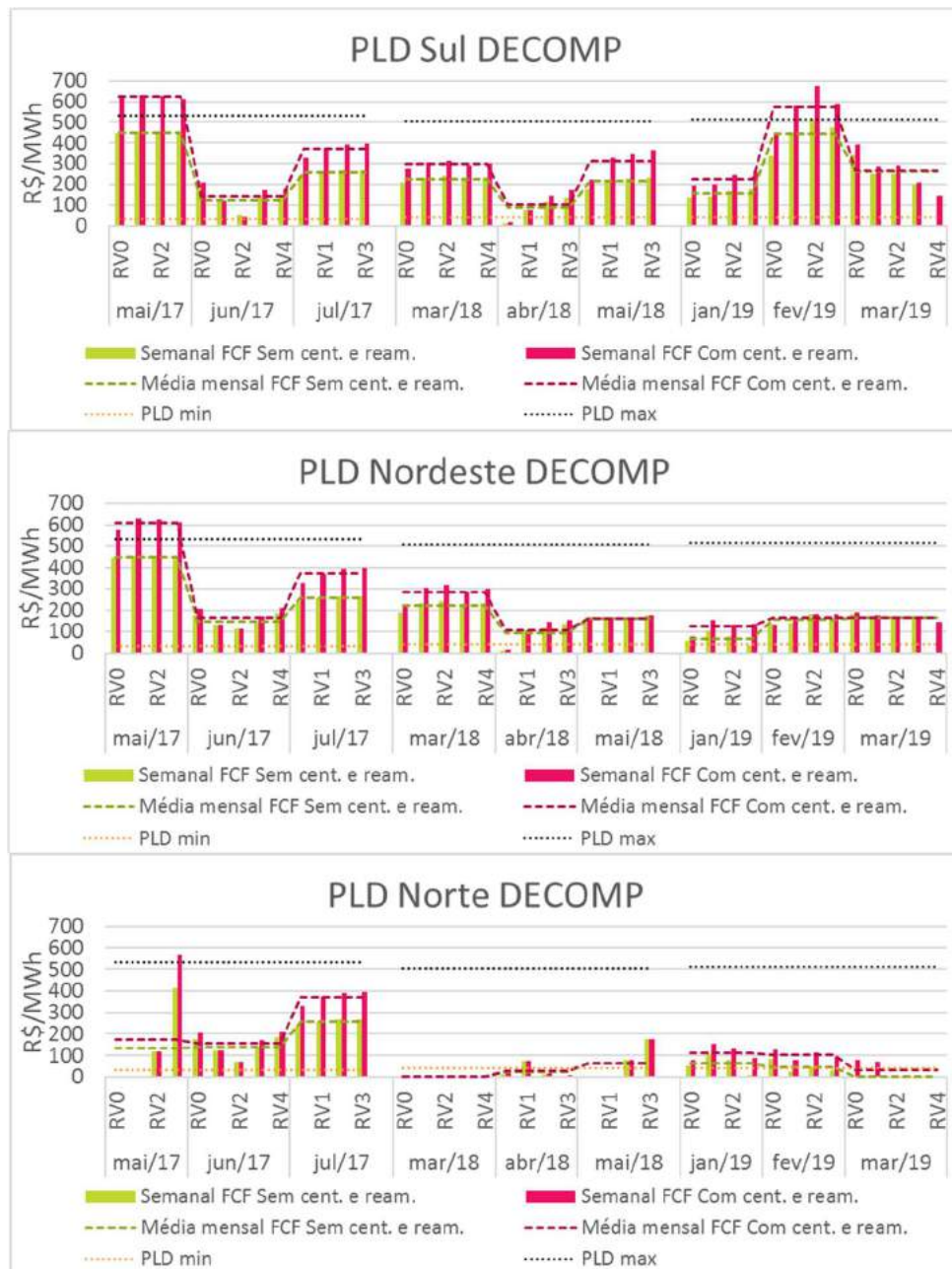


Figura 46 - Trajetórias de CMO/PLD do DECOMP para as rodadas encadeadas sem e com centroide + reamostragem plena passo 3 – submercados S, NE e N.

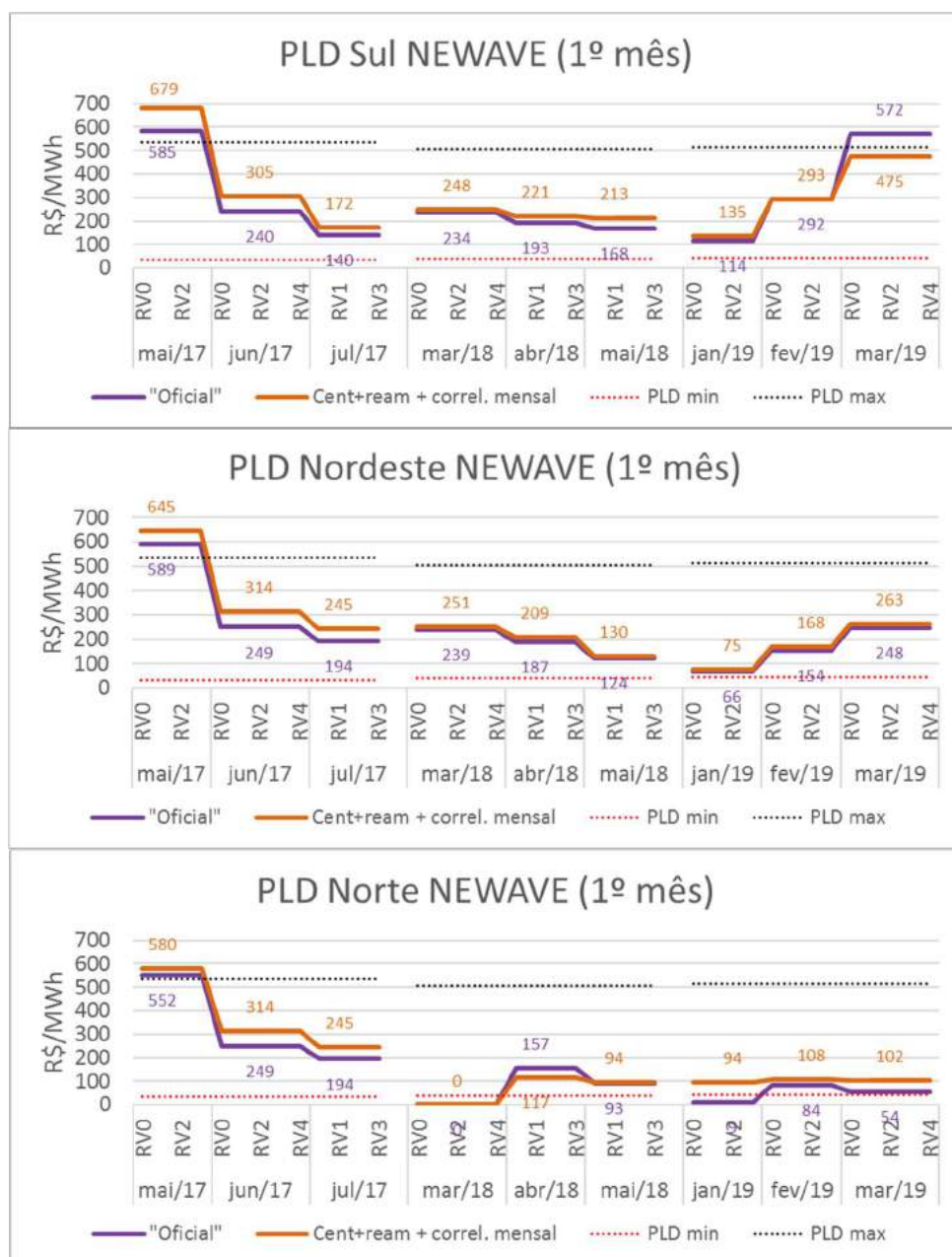


Figura 47 – Trajetórias de CMO/PLD do NEWAVE para as rodadas encadeadas sem centroide + reamostragem e com correlação espacial anual e com centroide + reamostragem e correlação espacial mensal – submercados S, NE e N.



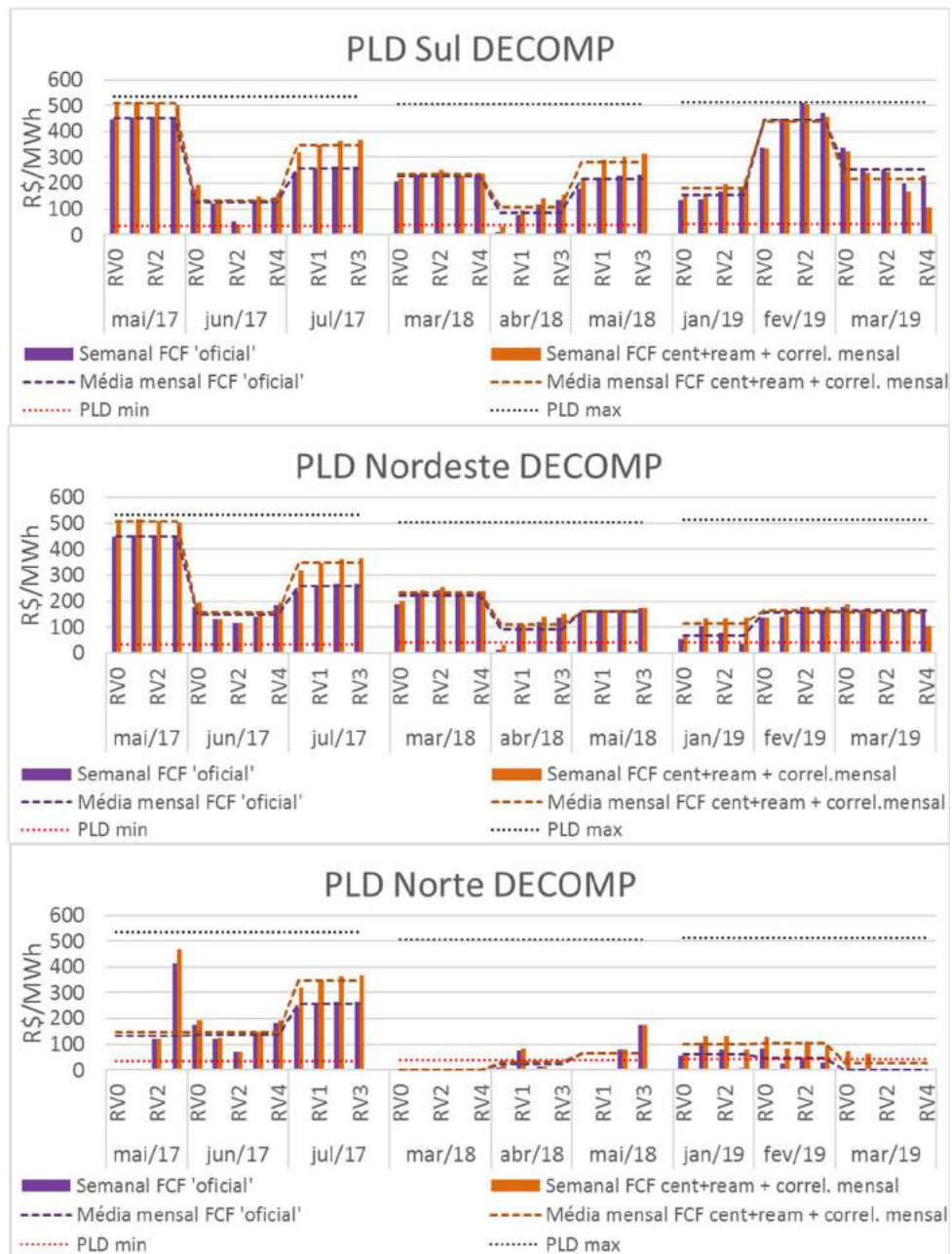


Figura 48 - Trajetórias de CMO/PLD do (DC) para rodadas encadeadas sem centr. + ream. e com correl. espacial anual e com centr. + ream. e correl. espacial mensal – submercados S, NE e N.