

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

GT Metodologia

Representação da Árvore de Cenários e
Variabilidade Amostral

⁹Relatório Técnico do GT Metodologia da CPAMP – nº 007-2019_rv0 de 12 de junho de 2019

Sumário

Sumário	2
Índice de Figuras	4
Índice de Tabelas	8
Apresentação	9
1. Introdução	1
2. Aperfeiçoamentos no processo de geração de cenários no modelo GEVAZP para o NEWAVE: Centroide	3
2.1. Metodologia.....	3
2.2. Sensibilidades	6
2.2.1. PMO Outubro/2018	6
2.2.2. PDE 2026	9
2.2.3. Caso Base para o LEN A-4/2018.....	13
2.3. Conclusão.....	20
3. Reamostragem dos cenários <i>Forward</i>	21
3.1. Metodologia.....	21
3.2. Sensibilidades (para subsidiar a definição do tipo de reamostragem e passo).....	22
3.2.1. PMO Julho/2014 e PMO Outubro/2018	23
3.2.2. PLD Junho/2018	27
3.2.3. PDE 2026	37
3.2.4. Caso Base para o LEN A-4/2018.....	42
3.2.5. Conclusão (quanto à definição do tipo de reamostragem e passo)	50
3.3. Avaliação quanto à variabilidade da <i>backward</i> ao considerar reamostragem da <i>forward</i>	
50	
3.3.1. PDE 2026	50
3.3.2. Caso Base para o LEN A-4/2018.....	54
3.3.3. Conclusão (quanto à variabilidade da <i>backward</i> ao se considerar reamostragem da <i>forward</i>)	60
4. Avaliação do número de <i>backwards</i> e <i>forwards</i>	61
4.1. Análise de energias	61
4.1.1. <i>Forward</i>	62
4.1.2. <i>Backward</i>	66
4.2. Análise do impacto na política operativa	69

4.2.1.	Com o aumento do número de <i>Forward</i>	69
4.2.2.	Com o aumento do número de <i>Backward</i>	72
4.3.	Conclusão.....	73
5.	Critério de Parada.....	74
6.	Aperfeiçoamentos no processo de geração de cenários no modelo GEVAZP para o DECOMP	80
6.1.	Metodologia.....	80
6.2.	Sensibilidades	84
6.2.1.	PLD Fevereiro/2019_RV0.....	84
6.2.2.	PMO Outubro/2018_RV0.....	87
6.3.	Conclusão.....	88
7.	Recomendações.....	89
8.	Referências	90
9.	Apêndice	92
9.1.	Teste t para o ZINF	92
9.2.	Teste t para o CMO	92

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Evolução do CMO médio das 2000 séries com 9 ou com 12 REEs, sem reamostragem.	1
Figura 2.1 – Exemplo ilustrativo da escolha do representante.	4
Figura 2.2 – (a) ZINF e (b) Custo de Operação variando-se a semente <i>backward</i> .	5
Figura 2.3 – Evolução do CMO do subsistema SE variando-se a semente <i>backward</i> (a) mais próximo (b) centroide.	5
Figura 2.4 – Média do custo de geração térmica e energia não suprida variando-se a semente <i>backward</i> e o representante da agregação.	6
Figura 2.5 – Evolução do CMO médio mensal - Sem Centroide - 20 sementes <i>backward</i> .	7
Figura 2.6 – Evolução do CMO médio mensal - Com Centroide - 20 sementes <i>backward</i> .	7
Figura 2.7 – CMO médio do 1º mês para o PMO Outubro/2018 - 20 sementes <i>backward</i> - Sem Centroide.	8
Figura 2.8 – CMO médio do 1º mês para o PMO Outubro/2018 - 20 sementes <i>backward</i> - Com Centroide.	8
Figura 2.9 – Análise da variabilidade do ZINF nos casos sem centroide.	8
Figura 2.10 – Análise da variabilidade do ZINF nos casos com centroide.	9
Figura 2.11 – ZINF na 45ª iteração - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso PDE 2026.....	10
Figura 2.12 – Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso PDE 2026.	11
Figura 2.13 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam - Mais próximo x Centroide - PDE 2026.....	12
Figura 2.14 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam - Mais próximo x Centroide - PDE 2026.....	12
Figura 2.15 –ZINF na 45ª iteração - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	14
Figura 2.16 – Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	15
Figura 2.17 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	15
Figura 2.18 - Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	16
Figura 2.19 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	17
Figura 2.20 – Evolução Mensal dos Custos Marginais de Operação no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	18
Figura 2.21 – Custo Marginal de Operação anual no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	19
Figura 3.1 – Custo total de operação com reamostragem plena - PMO julho/2014.	23
Figura 3.2 – Custo total de operação com reamostragem por recombinação - PMO julho/2014.	24
Figura 3.3 – Custo total de operação com reamostragem plena - PMO outubro/2018.	24
Figura 3.4 – Custo total de operação com reamostragem por recombinação - PMO outubro/2018.	24

Figura 3.5 – Média do CTO das 20 sementes, por passo, por tipo de reamostragem - PMO julho/2014	25
Figura 3.6 – Média do CTO das 20 sementes, por passo, por tipo de reamostragem - PMO outubro/2018	26
Figura 3.7 – Evolução do ZINF - PMO julho/2014 - Semente 0000.	26
Figura 3.8 – Evolução do ZINF - PMO outubro/2018 - Semente 0000.	26
Figura 3.9 – PLD Junho/2018 - Valor do Zinf na 45 ^a iteração.....	28
Figura 3.10 – PLD junho/2018 - Valores de Zinf por iteração para as 8 sementes com reamostragem plena.....	29
Figura 3.11 – PLD junho/2018 - Valores de Zinf por iteração para as 8 sementes com reamostragem por recombinação.....	30
Figura 3.12 – PLD junho/2018 - Custo total da operação.....	30
Figura 3.13 – PLD Junho/2018 - Gráfico de dispersão para a reamostragem por recombinação com desvio padrão do custo total da geração térmica do SIN.....	31
Figura 3.14 – PLD junho/2018 - Gráfico de dispersão para a reamostragem plena com desvio padrão do custo total da geração térmica do SIN.....	32
Figura 3.15 – PLD Junho/2018 - Reamostragem por recombinação: trajetória do CMO do submercado Sudeste.	33
Figura 3.16 – PLD Junho/2018 - Reamostragem por recombinação: Trajetória do CMO do submercado Nordeste.	33
Figura 3.17 – PLD Junho/2018 - Reamostragem plena: trajetória do CMO do submercado Sudeste.	34
Figura 3.18 – PLD Junho/2018 - Reamostragem plena: trajetória do CMO do submercado Nordeste.	34
Figura 3.19 – Avaliação do efeito da reamostragem no PLD no modelo DECOMP, no mês de junho/2018 para todas as semanas operativas.....	35
Figura 3.20 – Avaliação do efeito da reamostragem na geração térmica no modelo DECOMP, no mês de junho/2018 para todas as semanas operativas.	36
Figura 3.21 – ZINF na 45 ^a iteração - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.....	37
Figura 3.22 – Valores de ZINF ao longo das iterações - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.....	39
Figura 3.23 – Valor esperado do Custo Total de Operação - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.....	40
Figura 3.24 – Diagramas de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.	41
Figura 3.25 – ZINF na 45 ^a iteração – Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	42
Figura 3.26 – Valores de ZINF ao longo das iterações - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	44
Figura 3.27 – Valor esperado do Custo Total de Operação - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.	45
Figura 3.28 – Diagramas de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.	46
Figura 3.29 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.	47

Figura 3.30 – Evolução mensal dos Custos Marginais de Operação no período de planejamento - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	48
Figura 3.31 – Custo Marginal de Operação anual no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	49
Figura 3.32 – ZINF na 45 ^a iteração - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.	51
Figura 3.33 – Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.	52
Figura 3.34 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.....	53
Figura 3.35 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.....	53
Figura 3.36 –ZINF na 45 ^a iteração - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.	54
Figura 3.37 - Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.	56
Figura 3.38 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A -4/2018.....	57
Figura 3.39 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	57
Figura 3.40 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	58
Figura 3.41 – Evolução Mensal dos Custos Marginais de Operação no período de planejamento - SemReam – Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.	59
Figura 3.42 – Custo Marginal de Operação anual no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	60
Figura 4.1 – Distribuições acumuladas e estatística de teste.	61
Figura 4.2 – Relação dos casos rodados.	62
Figura 4.3 – Permanências da energia histórica e sintética da <i>forward</i>	63
Figura 4.4 – Relação dos casos rodados.	64
Figura 4.5 – Permanências da energia histórica e sintética <i>forward</i>	65
Figura 4.6 – Relação dos casos rodados.	66
Figura 4.7 – Permanências da energia histórica e sintética <i>backward</i>	67
Figura 4.8 – Valor esperado do Custo Total de Operação – PlenaP01 - Centroide – Variação do número de <i>forward</i> - Caso Base LEN A-4/2018.	69
Figura 4.9 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - PlenaP01 - Centroide - Variação do número de <i>forward</i> - Caso Base LEN A-4/2018.	70
Figura 4.10 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - PlenaP01 - Centroide - Variação do número de <i>forward</i> - Caso Base LEN A-4/2018.	70
Figura 4.11 – ZINF na 45 ^a iteração – PlenaP01 - Centroide – Variação do número de <i>forward</i> - Caso Base LEN A-4/2018.	71
Figura 4.12 – ZINF na 45 ^a iteração - PlenaP01 – Centroide - Variação do número de <i>forward</i> - Variação de sementes <i>backward</i> e de sementes <i>forward</i> - Caso Base LEN A-4/2018.	71
Figura 4.13 – Tempo de execução - PlenaP01 - Centroide - Variação do número de <i>forward</i> - Caso Base LEN A-4/2018.	72

Figura 4.14 – Custo total de operação em cada uma das 20 sementes <i>backward</i> - PMO Julho/2014.....	73
Figura 4.15 – Custo total de operação em cada uma das 20 sementes <i>backward</i> - PMO Outubro/2018.....	73
Figura 5.1 – Evolução do ZINF ao longo das iterações do algoritmo de PDDE.....	75
Figura 5.2 – Evolução do delta de ZINF ao longo das iterações do algoritmo de PDDE.....	76
Figura 5.3 – CMO ao longo das iterações	77
Figura 5.4 – PLD de junho/2018 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.....	78
Figura 5.5 – Caso Base do LEN A-4/2018 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.....	78
Figura 5.6 – PDE 2026 - Ano 2026 - SE - Patamar 1 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.....	78
Figura 5.7 – PDE 2027 - Ano 2023-2027 - SE - Patamar 1 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.....	79
Figura 6.1 – Proposta para geração de cenários para o curto prazo - Esquema resumido.....	80
Figura 6.2 – Construção da árvore de cenários para o DECOMP com agregação dos ruídos.	81
Figura 6.3 – Índice de similaridade para a média (a) e para o desvio padrão (b) para o PMO Fev/2019, Rev 2.	82
Figura 6.4 – Distribuição de frequência acumulada das 10 sementes geradas utilizando a metodologia oficial (a) e a proposta (b) para o PMO Fevereiro/2019, Rev 2.	82
Figura 6.5 – Evolução do CMO do primeiro estágio obtido pelo método tradicional e com a metodologia proposta.	83
Figura 6.6 – Coeficiente de variação do CMO do primeiro estágio para os 10 conjuntos de cenários obtidos pelo método tradicional (linha em vermelho) e com a metodologia proposta (linha azul).....	84
Figura 6.7 – PLD médio semanal por submercado (GEVAZP sem centroide) - Fevereiro/2019, Rev 0.	85
Figura 6.8 – PLD médio semanal por submercado (GEVAZP com centroide) - Fevereiro/2019, Rev 0.	85
Figura 6.9 – PLD da média das sementes para cada submercado (GEVAZP com ou sem centroide).	86
Figura 6.10 – CMO médio semanal por submercado (Resultados do DECOMP usando GEVAZP 7 sem considerar o centroide com representante do grupo) - Outubro/2018, Rev 0.	87
Figura 6.11 – CMO médio semanal por submercado (Resultados do DECOMP usando GEVAZP 7.1 considerando o centroide com representante do grupo) - Outubro/2018, Rev 0.	87
Figura 6.12 – CMO médio das sementes para cada submercado.	88

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Média e Desvio Padrão do ZINF da 45ª iteração das 20 sementes, com e sem o uso do centroide como representante da agregação.....	9
Tabela 2.2 – ZINF na 45ª iteração - Intervalo de Confiança (95%) - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso PDE 2026.....	10
Tabela 2.3 – ZINF na 45ª iteração - Intervalo de Confiança (95%) - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	14
Tabela 3.1 – Descrição dos casos processados.....	23
Tabela 3.2 – Média e Desvio Padrão das 20 sementes para cada tipo de reamostragem, por PMO.....	25
Tabela 3.3 – Análise do ZINF da 45ª iteração (na semente padrão).	27
Tabela 3.4 – PLD junho/2018 - Valor esperado e desvio padrão para o estimador de Zinf na 45ª iteração para as 8 sementes de cada amostra.	28
Tabela 3.5 – ZINF na 45ª iteração - Intervalo de Confiança (95%) - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.....	38
Tabela 3.6 – ZINF na 45ª iteração – Intervalo de Confiança (95%) – Tipos de Reamostragem – Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	43
Tabela 3.7 – ZINF na 45ª iteração - Intervalo de Confiança (95%) - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDF 2026.....	52
Tabela 3.8 – ZINF na 45ª iteração – Intervalo de Confiança (95%) - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.....	55
Tabela 4.1 – Percentual de rejeição do teste de <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	64
Tabela 4.2 – Percentual de rejeição do teste de <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	66
Tabela 4.3 – Percentual de rejeição do teste de <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	68
Tabela 6.1 – Estatísticas do PLD.....	86
Tabela 6.2 – Desvio Padrão.....	88

Apresentação

Este relatório está inserido no contexto do Grupo de Trabalho “Questões Metodológicas Associadas aos Modelos Computacionais para o Planejamento da Expansão, Operação do Sistema Elétrico Brasileiro - SEB e Formação do Preço do Mercado de Curto Prazo”, chamado de GT 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 a CCEE.

O Grupo de Metodologia da CPAMP é coordenado pela Empresa de Pesquisa Energética -EPE (representada pela Assessoria da Presidência e Superintendência de Planejamento da Geração – SGE) e conta com a participação do Ministério de Minas e Energia - MME (representado pelas Secretarias de Energia Elétrica – SEE, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – SPE e Assessoria Econômica - Assec), da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (representada pela Superintendência de Regulação da Geração – SRG), do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (representado pela Gerência Executiva de Planejamento Energético) e da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE (representada pela Gerência Executiva de Preços - GEPRE). O grupo conta com a assessoria técnica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (representado pelo Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente).

Este relatório apresenta os estudos desenvolvidos pelo GT Metodologia no ciclo 2018/2019 e as propostas de aperfeiçoamento visando a redução da variabilidade amostral associadas a geração de cenários de energia afluente.

1. Introdução

Após a aprovação da entrada de 12 Reservatórios Equivalentes de Energia - REEs pela CPAMP, em julho de 2017, as simulações com os PMOs a partir de agosto de 2017 mostraram, para todos os meses, uma redução abrupta do CMO no quarto mês, na consulta à Função de Custo Futuro (FCF), que se refletia em uma menor geração térmica nos estudos de PMO, conforme apresentado na Figura 1.1, que exibe a evolução do CMO médio para 2000 séries sintéticas nos PMOs de agosto a novembro de 2017.

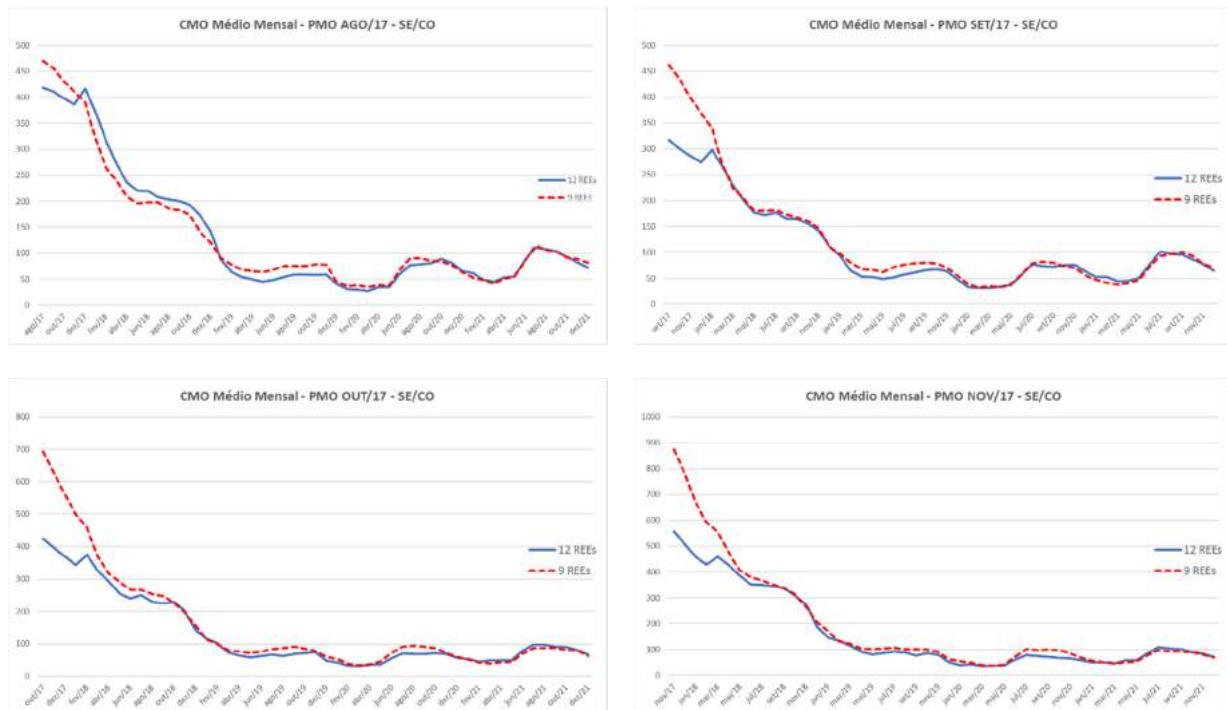


Figura 1.1 – Evolução do CMO médio das 2000 séries com 9 ou com 12 REEs, sem reamostragem.

Naquele momento, foram realizadas diversas avaliações pelas instituições integrantes da CPAMP e pelo CEPEL, visando identificar a causa desse comportamento, com as quais não foi possível constatar nenhum erro de programação. Análises preliminares sinalizaram, então, a necessidade de realizar estudos e indicar avanços metodológicos que contribuissem com a melhoria da árvore de cenários e a redução da variabilidade amostral, reduzindo assim a probabilidade de que situações como essa voltassem a se repetir. O estudo da árvore de cenários do modelo NEWAVE foi, então, priorizado na CPAMP com o objetivo de sinalizar aperfeiçoamentos a serem operacionalizados em janeiro de 2019.

Durante o ciclo 2017-2018, o GT Metodologia identificou alternativas para aprimorar a representação da árvore de cenários e reduzir a variabilidade amostral, dentre elas a consideração da metodologia de reamostragem dos cenários *forward*. Evidenciou-se também, a necessidade de se aprofundar em outros estudos, por exemplo, com relação à variabilidade amostral da *backward*. No entanto, o GT Metodologia entendeu que seria importante aprofundar as análises para responder algumas questões que surgiram ao longo das discussões, sendo os prazos

insuficientes para conclusão dos estudos e, portanto, avaliou que seria prudente postergar a implementação dos avanços já identificados para o ano seguinte, 2020.

Este documento apresenta aprimoramentos no processo de geração de cenários no modelo GEVAZP para o NEWAVE no capítulo 2 e para o DECOMP no capítulo 6. No capítulo 3 apresenta uma breve descrição da metodologia de reamostragem dos cenários de afluências *forward*. O capítulo 4 apresenta uma avaliação do número de *backwards* e *forwards*. Uma análise do critério de parada é apresentada no capítulo 5. As recomendações estão apresentadas no capítulo 7.

2. Aperfeiçoamentos no processo de geração de cenários no modelo GEVAZP para o NEWAVE: Centroide

2.1. Metodologia

A geração de cenários sintéticos de afluências possui um relevante papel para a definição do planejamento da operação energética de médio/longo prazo, representando a principal fonte de incerteza desse processo nessa escala temporal. Como mencionado anteriormente, durante estudos da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP) do ciclo 2018/2019, identificou-se um padrão anômalo na evolução do custo marginal da operação (CMO). Esse comportamento foi avaliado detalhadamente pelo CEPEL no Relatório Técnico intitulado “Análise da inflexão do custo marginal de operação no modelo NEWAVE entre os quarto e quinto estágios temporais ao se adotar a representação de 12 REEs para Sistema Interligado Nacional” de setembro de 2018 [1]. Naquela ocasião, chegou-se à conclusão que a redução abrupta do CMO foi ocasionada pela geração de cenários de afluência com valores atípicamente superiores, gerados pelo sorteio de ruídos aleatórios com média bastante elevada, cuja probabilidade de ocorrência era bem pequena ($\sim 0.27\%$).

Durante os estudos sobre a reamostragem de cenários *forward* empregados no modelo NEWAVE [2], [3], foram realizadas sensibilidades com relação à árvore de cenários utilizada na solução do problema de planejamento da operação (árvore completa). Observou-se que a variabilidade dos resultados era grande e, em princípio, a reamostragem de cenários da simulação *forward* não era suficiente para reduzir a variabilidade amostral associada à árvore completa, definida pelos cenários da recursão *backward*.

A partir destas análises, o CEPEL investigou aprimoramentos no processo de geração de cenários de afluências de forma a minimizar a ocorrência de cenários tão atípicos e a variabilidade amostral. No relatório técnico intitulado “Avaliação de alternativas para escolha do representante no processo de agregação da Amostragem Seletiva” [4] apresentou-se uma alternativa para a escolha do representante do processo de agregação do processo de Amostragem Seletiva (AS), que resultou em uma redução na variabilidade amostral observada nos resultados do planejamento da operação de médio/longo prazo. A seguir será abordado de forma resumida o conteúdo do referido relatório técnico.

O processo atualmente empregado no modelo GEVAZP [5] para geração dos cenários adota em sua modelagem estocástica a família de modelos autorregressivos periódicos de ordem p , PAR(P), e a amostra de ruídos aleatórios utilizada é obtida através do método de Amostragem Seletiva partir de uma distribuição multivariada lognormal, onde cada componente da variável aleatória representa o ruído de um reservatório equivalente de energia considerado na configuração.

A Amostragem Seletiva [6], [7] consiste em aplicar técnicas de agregação para gerar as amostras de ruídos aleatórios multivariados com o intuito de aumentar a representatividade da amostra. Inicialmente gera-se uma amostra de 100 mil vetores de ruídos aleatórios independentes $\sim N(0,1)$,

onde cada componente do vetor de ruídos independentes corresponde a um REE. A esta amostra inicial dá-se o nome de "amostra original". Depois de gerados, os vetores de ruídos independentes são agregados através da técnica de agregação *K-means*, que servem para diminuir a dimensionalidade dos dados enquanto se preserva a exploração do espaço amostral. Após a conclusão do processo de agregação é selecionado um representante para cada grupo, e o conjunto destes representantes irá formar a amostra de ruídos *backward* e *forward*.

A aplicação das técnicas de agregação na amostra original, cujo algoritmo envolve a substituição de agrupamentos de objetos da amostra original por um único representante, resulta na obtenção de amostras agregadas com menor variabilidade do que a correspondente amostra original (a variabilidade interna nos agrupamentos é perdida). Para os estudos de PMO realizados à época da validação da Amostragem Seletiva, a forma de atenuar a redução do desvio padrão na amostra agregada foi selecionar como representante dos grupos o objeto mais próximo do centroide ao invés do próprio centroide, conforme ilustrado na Figura 2.1. Mais detalhes sobre a Amostragem Seletiva podem ser consultados na Nota Técnica 42 que consta do anexo do relatório técnico [4].

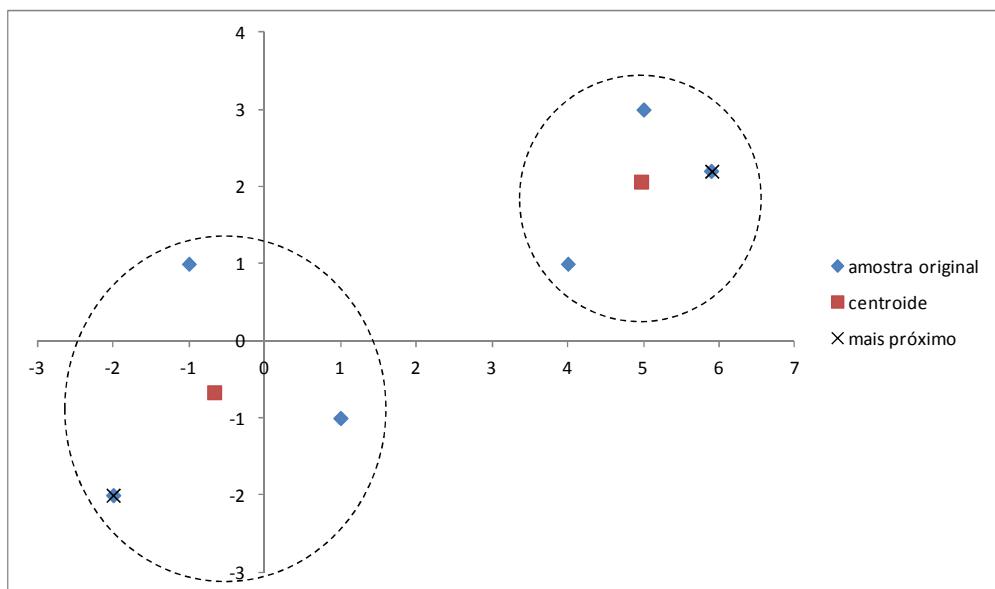


Figura 2.1 – Exemplo ilustrativo da escolha do representante.

À medida que a representação do Sistema Interligado Nacional foi se tornando mais refinada, através da utilização de um número maior de REEs, a dimensionalidade do problema de agregação foi aumentando e tornando-o mais complexo. Desta forma, a consideração do elemento mais próximo do centroide como o representante do grupo formado pelo processo de agregação, apesar de reproduzir melhor o desvio padrão da distribuição, pode tornar mais provável a ocorrência de um representante extremo em uma ou mais dimensões do vetor de ruídos, isto é, um ou mais REEs podem assumir valores muito elevados/baixos de ENA em um determinado período.

Portanto, a fim de reduzir a chance de ocorrência deste comportamento, foi avaliada a opção de utilizar o próprio centroide como representante do grupo. Ao considerar o centroide, a média dos vetores de ruídos tende a zero, porém o desvio padrão fica mais degradado (menor do que 1). Todavia, esta degradação pode ser contornada através do uso de um fator de compensação do desvio padrão, de forma que um aumento da degradação resulta em um fator de compensação maior, o que ao final do processo leva a um desvio padrão tendendo a 1, conforme desejado.

A eficácia da utilização do centroide na redução da variabilidade amostral foi comprovada através de diversos estudos e análises realizadas pelo GT-Metodologia/CPAMP com o suporte técnico do CEPPEL. A seguir são apresentados alguns resultados obtidos com a política de operação considerando 10 árvores de cenários distintas (variação da semente *backward*), para um caso baseado no PMO SET/2017 considerando 12 REEs.

A Figura 2.2 (a) mostra o gráfico *boxplot* dos valores de ZINF considerando o mais próximo (base) e centroide como representante da agregação. É possível observar que há uma considerável diminuição da variabilidade dos resultados entre as diferentes sementes *backward*. O valor esperado do custo total de operação (COPER) é apresentado na Figura 2.2 (b) e novamente é possível observar uma considerável redução da variabilidade dos resultados quando utilizado o centroide como objeto representante no processo de agregação.

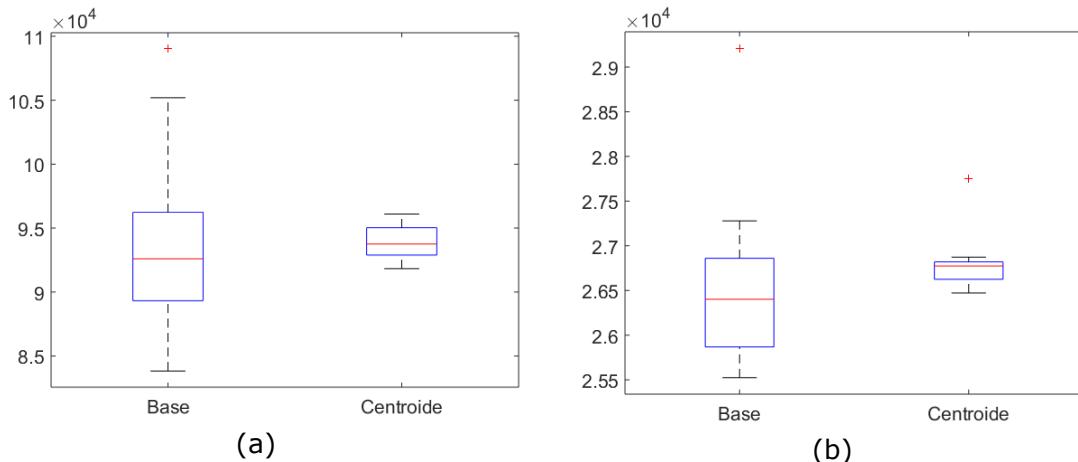


Figura 2.2 – (a) ZINF e (b) Custo de Operação variando-se a semente *backward*.

A Figura 2.3 apresenta a evolução do CMO para o subsistema Sudeste considerando as diversas sementes *backward*, com o mais próximo (à esquerda) e com centroide (à direita). Novamente é possível observar uma redução da variabilidade dos resultados obtidos com o centroide. Além disso, verifica-se que a inflexão da evolução do CMO que ocorria na semente 0 (utilizada em casos oficiais, destacada na Figura 2.3 (a) não é observada com o centroide.

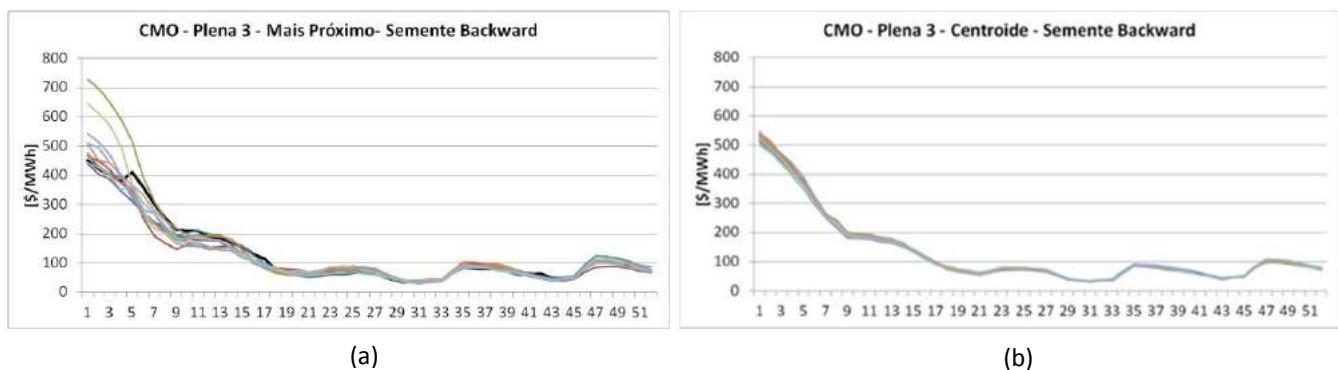


Figura 2.3 – Evolução do CMO do subsistema SE variando-se a semente *backward* (a) mais próximo (b) centroide.

Por último, a Figura 2.4 traz a média do custo de geração térmica (eixo x) de cada caso com relação ao valor esperado da energia não-suprida - ENS (eixo y), para cada um dos 22 casos (sementes *backward* diferentes). Nota-se uma redução na variabilidade dos resultados tanto da ENS quanto do custo de geração térmica.

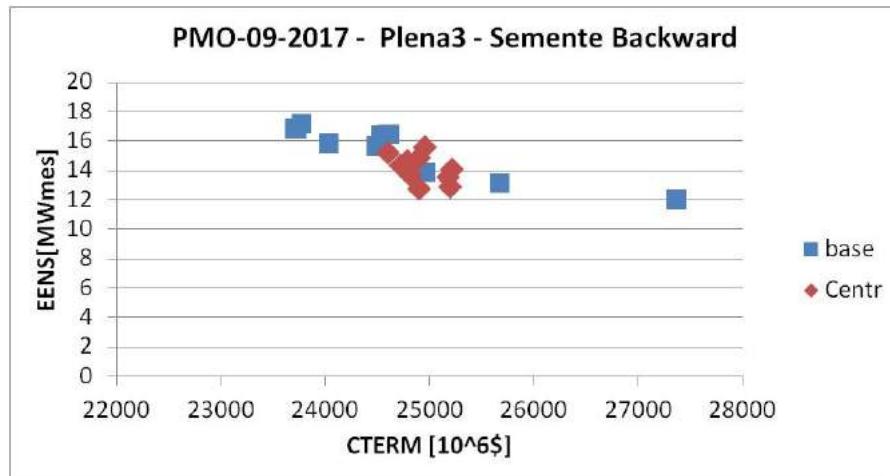


Figura 2.4 – Média do custo de geração térmica e energia não suprida variando-se a semente *backward* e o representante da agregação.

A mesma estabilidade verificada nos resultados acima também pode ser observada em variáveis associadas diretamente à operação do sistema, conforme mostrado em [4], quando se considera o centroide como representante do grupo.

2.2. Sensibilidades

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o modelo NEWAVE nos diferentes estudos para o planejamento da expansão e da operação ao se trocar o representante do processo de agregação de ruídos no processo de geração de cenários hidrológicos.

Com o intuito de avaliar o impacto dessa troca sobre a variabilidade amostral associada à árvore completa, definida pelos cenários da recursão *backward*, foram simulados diversos casos considerando diferentes sementes para a geração dos cenários da recursão *backward*. Para tanto, o CEPEL disponibilizou para a CPAMP para realização das análises pelo GT Metodologia, versão do modelo NEWAVE que permite variar a semente *backward*. Entretanto, a versão a ser encaminhada para homologação da ANEEL futuramente, não deverá conter essa opção.

2.2.1. PMO Outubro/2018

Conforme descrito no item 1, no PMO de outubro/2017 foi observado um “dente” ou inflexão na evolução do CMO médio mensal para 2000 séries. A partir desse momento, com a disponibilização da versão onde foi possível escolher o representante da agregação de ruídos como o próprio centroide (e não mais o mais próximo do centroide), foi possível analisar os impactos dessa implementação variando-se tanto as sementes *backward* quanto as sementes *forward*, conforme veremos a seguir.

Assim, foram analisadas 20 diferentes sementes *backward* para o PMO de outubro/2018, com e sem o uso do centroide como representante da agregação de ruídos. Nas análises que se seguem são apresentados os resultados em casos neutros ao risco.

Nos casos sem a consideração do centroide (mais próximo), conforme Figura 2.5, é possível notar uma grande amplitude nos valores do CMO médio mensal ao variar a semente *backward*. Por exemplo, para o mês outubro do primeiro ano, os CMOs médios variam entre 400 e 680 R\$/MWh.

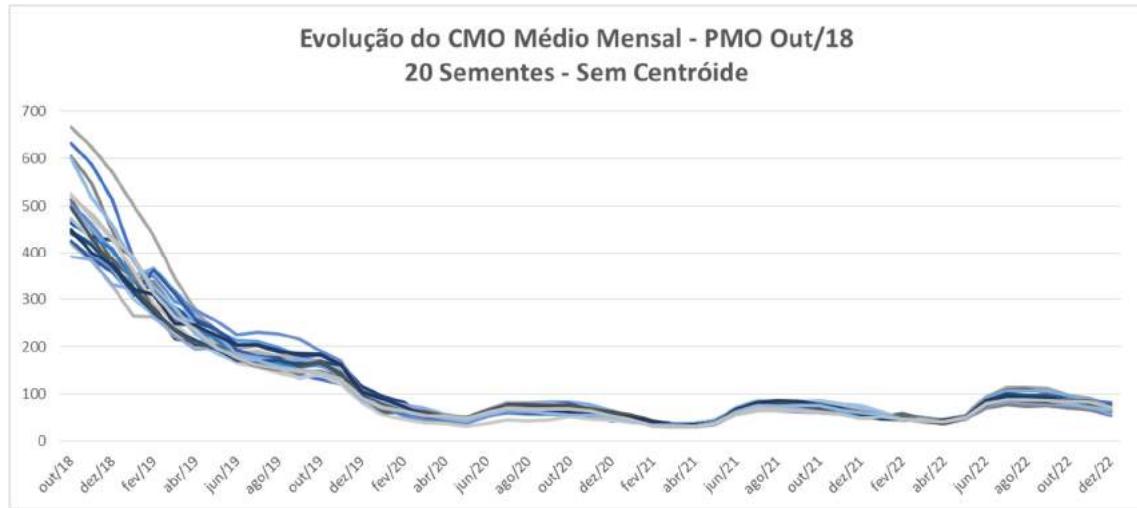


Figura 2.5 – Evolução do CMO médio mensal - Sem Centroíde - 20 sementes *backward*.

Este comportamento não é verificado ao adotar-se o centroide como representante da agregação, conforme observamos na Figura 2.6. Neste caso, para o mesmo mês de outubro, a variação do CMO médio situa-se entre 450 e 550 R\$/MWh.

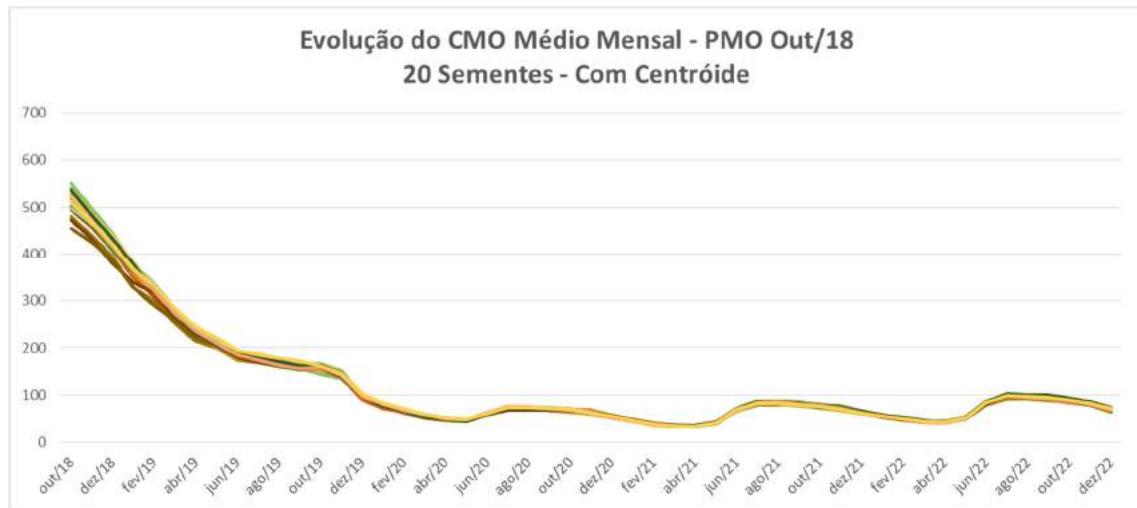


Figura 2.6 – Evolução do CMO médio mensal - Com Centroíde - 20 sementes *backward*.

As figuras a seguir mostram, para cada uma das sementes *backward* testadas, o CMO médio do primeiro mês. Na Figura 2.7, podemos observar uma maior variabilidade nos valores obtidos para os casos sem o uso do centroide como representante da agregação de ruídos. A medida de variabilidade está ilustrada como a amplitude máxima observada nos CMOs.

CMO Médio do 1º Mês - PMO Out/18
20 Sementes - Sem Centroíde

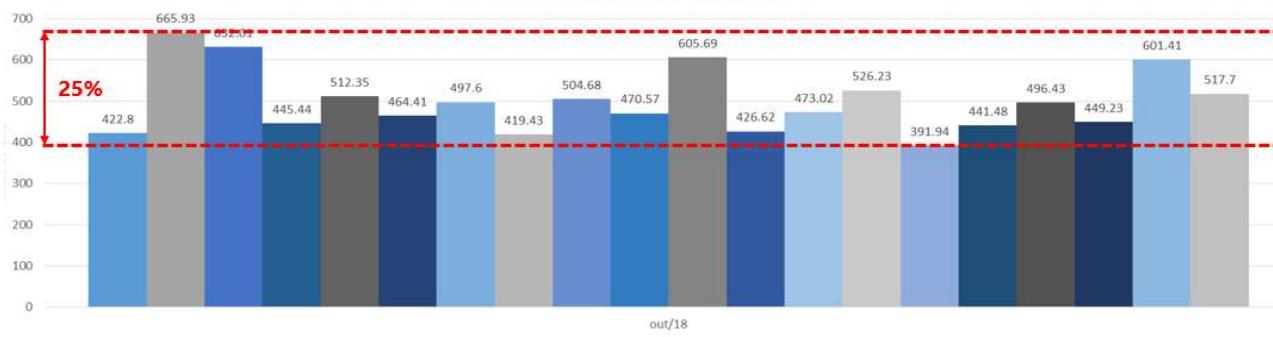


Figura 2.7 – CMO médio do 1º mês para o PMO Outubro/2018 - 20 sementes backward - Sem Centroíde.

Na Figura 2.8, observa-se a redução da variabilidade amostral nos mesmos casos processados, contudo, utilizando o centroíde como representante da agregação.

CMO Médio do 1º Mês - PMO Out/18
20 Sementes - Com Centroíde



Figura 2.8 – CMO médio do 1º mês para o PMO Outubro/2018 - 20 sementes backward - Com Centroíde.

A partir da Figura 2.9, são exibidos os resultados das análises do ZINF da 45ª iteração nos casos com e sem centroíde para o PMO de outubro/18.

Análise do ZINF - PMO OUT/18 - Sem Centroíde

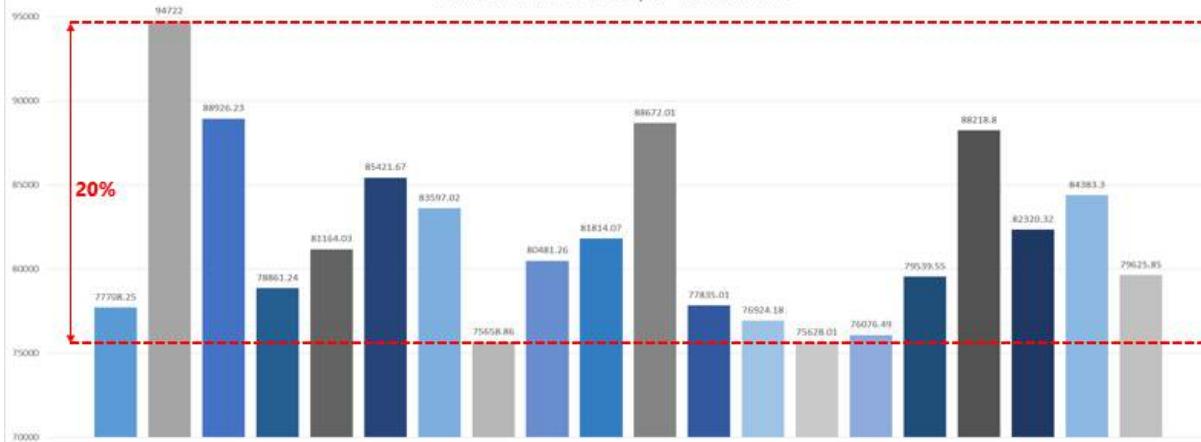


Figura 2.9 – Análise da variabilidade do ZINF nos casos sem centroíde.

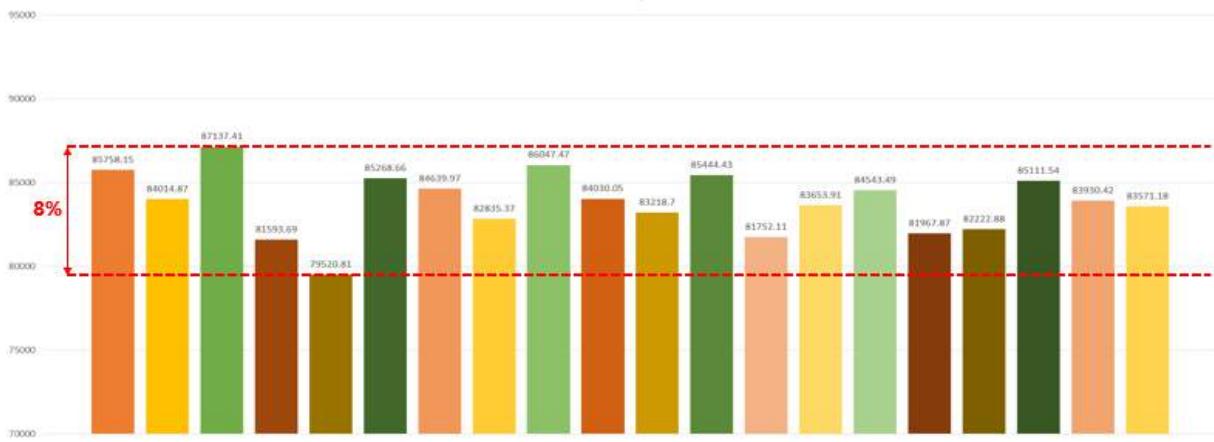


Figura 2.10 – Análise da variabilidade do ZINF nos casos com centroíde.

De acordo com a Tabela 2.1, podemos verificar que os casos com o uso do centroíde como representante da agregação de ruídos possuem menores valores de desvio padrão para os valores de ZINF em relação aos casos sem centroíde, para o PMO de outubro/2018.

Tabela 2.1 – Média e Desvio Padrão do ZINF da 45^a iteração das 20 sementes, com e sem o uso do centroíde como representante da agregação.

PMO	Representante da Agregação	Média (R\$10 ⁶)	Desvio Padrão (R\$10 ⁶)	Limite Inferior	Limite Superior
Out/2018	Sem Centroide	75.166,82	4.862,99	65.635,35	84.698,28
	Com Centroide	78.040,19	1.700,32	74.707,57	81.372,82

2.2.2. PDE 2026

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o modelo NEWAVE para um caso de Plano Decenal de Energia considerando como representante do processo de agregação de ruídos o elemento mais próximo ao centroíde ou o próprio centroíde.

O caso de referência utilizado é o Caso do PDE 2026 (1.1)[16], no qual são considerados 11 reservatórios equivalentes de energia, CVaR com parametrização (50,40), 200 simulações *forward* e 20 aberturas para as recursões *backward* utilizadas na construção da política de operação.

A fim de avaliar o impacto do representante do processo de agregação dos ruídos na variabilidade dos cenários da recursão *backward*, o caso de referência foi executado na versão 25.6 do modelo NEWAVE sem a consideração de reamostragem da *forward*, com 45 iterações fixas e variando-se a semente inicial *backward*. Para cada representante do processo de geração de cenários, foi considerada uma amostra de 11 elementos, variando-se a semente *backward* de 0 a 10.

A Figura 2.11 comprehende dois gráficos que consideram os resultados das 11 sementes. O primeiro apresenta os valores de ZINF na 45^a iteração e o segundo, a média dos Valores Esperados de Zinf na 45^a iteração. Neste contexto, foram considerados para cada representante do processo de agregação de ruídos: o estimador da média; o estimador do desvio padrão e o intervalo de

confiança para o ZINF, conforme apresentado na seção 9.1. E, para 11 sementes *backward*, o valor crítico, considerando 95% de nível de confiança, é 2,228.

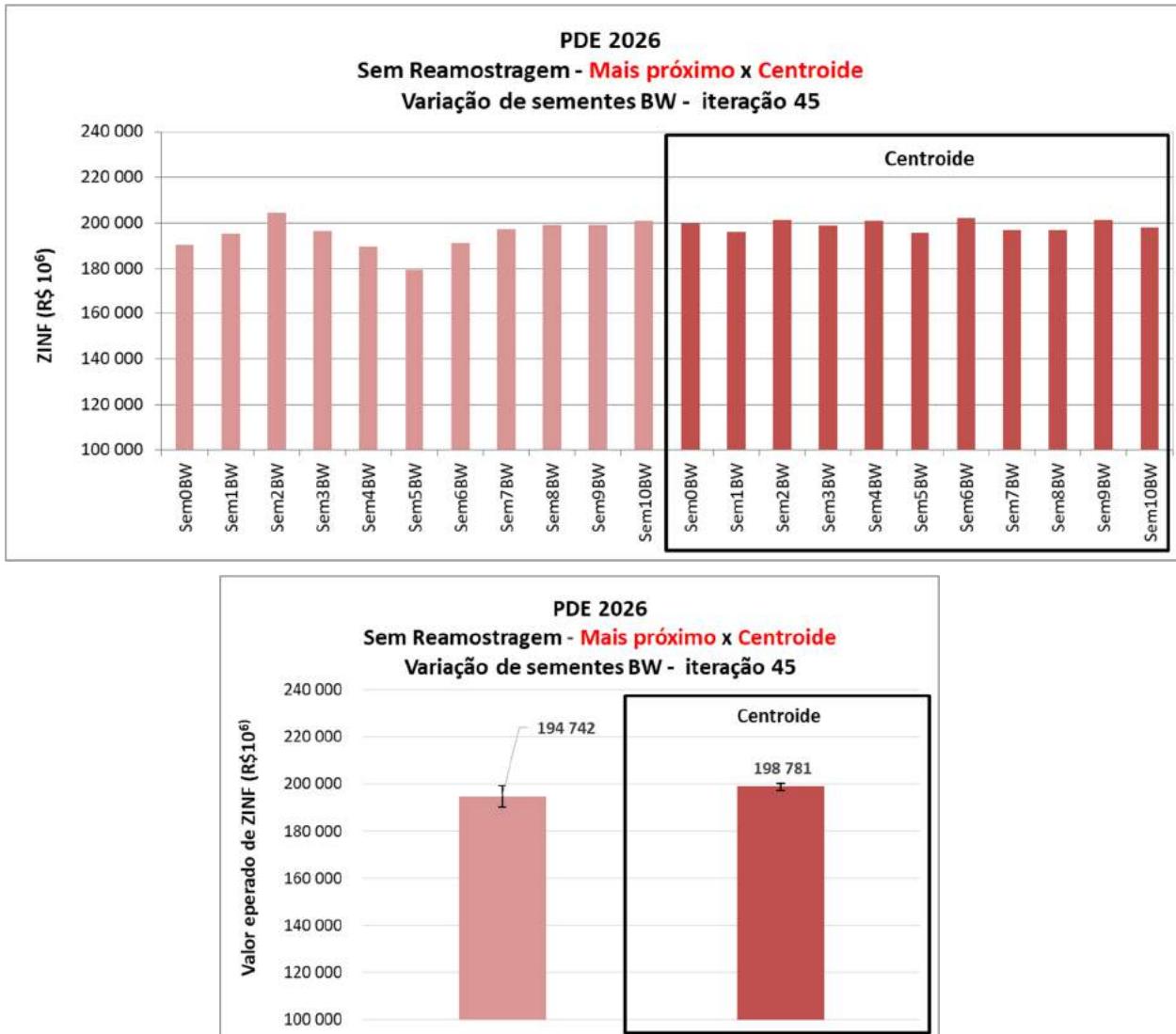


Figura 2.11 – ZINF na 45^a iteração - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso PDE 2026.

Tabela 2.2 – ZINF na 45^a iteração - Intervalo de Confiança (95%) - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso PDE 2026.

Mais próximo x Centroide	ZINF na 45 ^a iteração (amostra de 11 sementes <i>backward</i>)		
	Média (R\$10 ⁶)	Desvio Padrão (R\$10 ⁶)	IC (95%)
Sem Ream_mais próximo	194.742	2.075	[190.120; 199.364]
SemReam_centroide	198.781	713	[197.191; 200.370]

Como resultado da adoção do centroide como representante do processo de agregação de ruídos, observa-se:

- i. Redução significativa no desvio padrão dos valores de ZINF na 45^a iteração.
- ii. Não haver tendência de crescimento ou redução nos valores de ZINF. Por exemplo, para a semente 0, há aumento, enquanto para a semente 4 há redução do valor de ZINF.

A Figura 2.12 apresenta a trajetória dos valores de ZINF ao longo das iterações para 11 sementes *backward*, tanto para o processo de agregação do elemento mais próximo quanto para o centroide, conforme indicado nos respectivos gráficos. Dessa forma, ao comparar os resultados de ambos processos de agregação, é possível observar a adoção do centroide provoca uma redução da variabilidade dos valores de ZINF também ao longo das iterações.

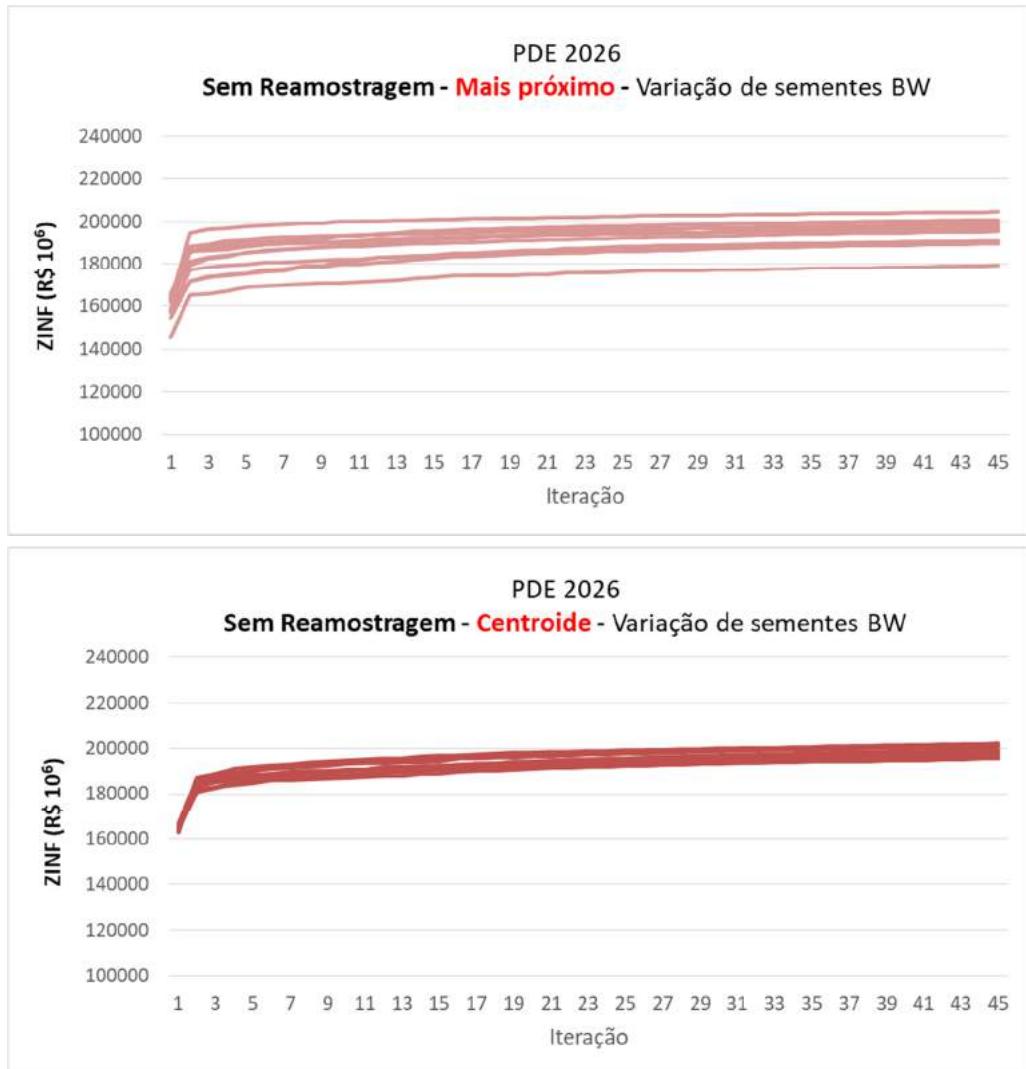


Figura 2.12 – Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso PDE 2026.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da simulação final com 2.000 cenários de séries sintéticas, para cada uma das 11 sementes *backward*. Considerando ora o representante do processo de agregação de ruídos o elemento mais próximo ao centroide, ora o próprio centroide.

A Figura 2.13 apresenta o valor esperado do custo total de operação referenciado ao primeiro ano do período de planejamento. Observa-se, ao se considerar o centroide como representante do processo de agregação de ruídos:

- i. Redução da variabilidade do custo total de operação, ao se variar sementes *backward*.
- ii. Não haver tendência de crescimento ou redução nos valores de custo total de operação.

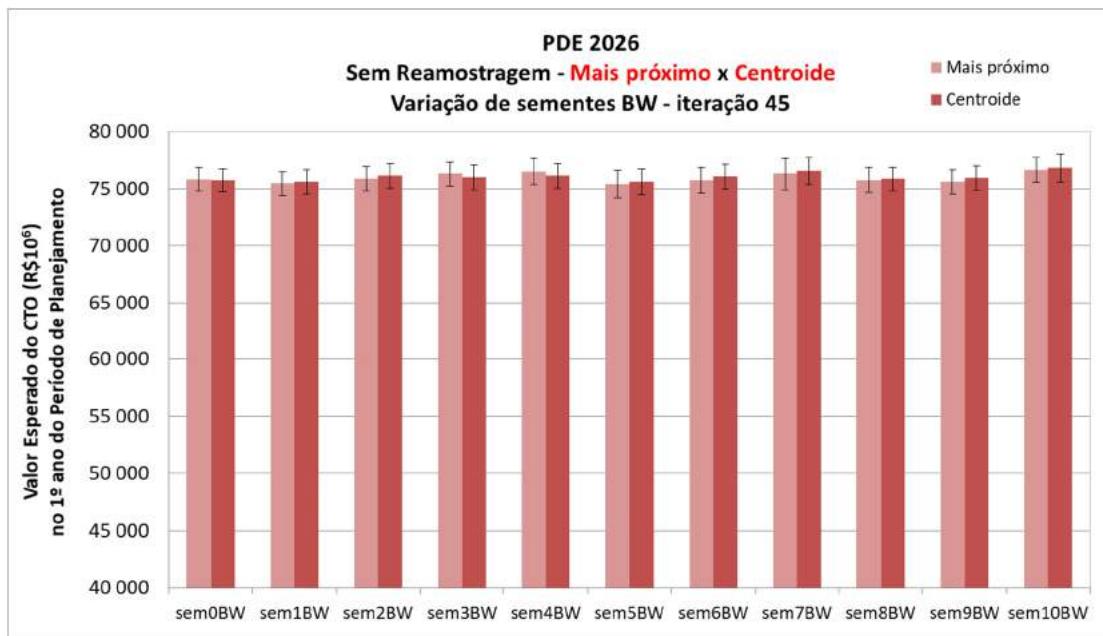


Figura 2.13 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam - Mais próximo x Centroide - PDE 2026.

A Figura 2.14 apresenta o diagrama de dispersão para o custo de geração térmica versus o custo de déficit. Observa-se, ao se considerar o centroide como o representante do processo de agregação de ruídos:

- Redução da variabilidade do custo de déficit.
- Não houve alteração da variabilidade do custo de geração térmica.

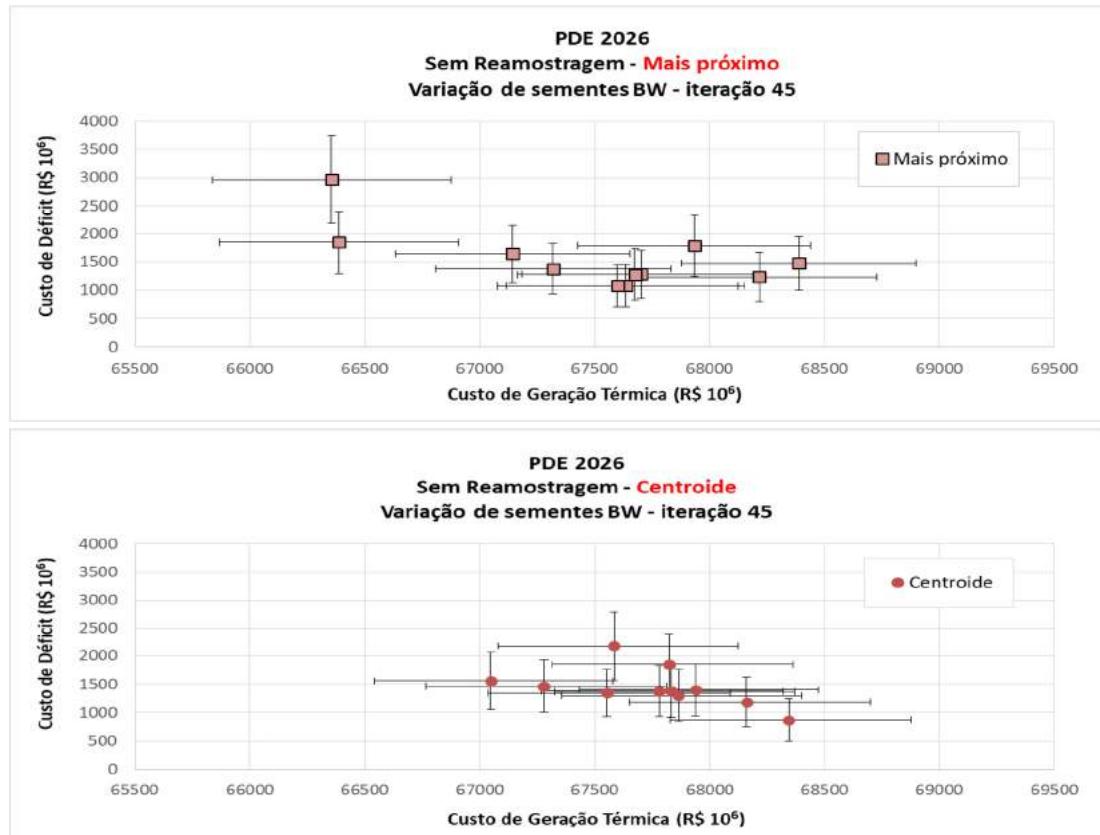


Figura 2.14 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam - Mais próximo x Centroide - PDE 2026.

2.2.3. Caso Base para o LEN A-4/2018

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o modelo NEWAVE para um caso típico de cálculo de garantias físicas (estático, com 10 anos de período de pré-estudo, 5 anos de período de planejamento e 5 anos de período pós) considerando como representante do processo de agregação de ruídos o elemento mais próximo ao centroide ou o próprio centroide.

O caso de referência utilizado é o Caso Base para o LEN A-4/2018 [15], no qual são considerados 12 reservatórios equivalentes de energia, CVaR com parametrização (50,40), 200 simulações *forward* e 20 aberturas para as recursões *backward* utilizadas na construção da política de operação.

A fim de avaliar o impacto do representante do processo de agregação dos ruídos na variabilidade dos cenários da recursão *backward*, o caso de referência foi executado na versão 25.6 do modelo NEWAVE sem a consideração de reamostragem da *forward*, com 45 iterações fixas e variando-se a semente inicial *backward*. Para cada representante do processo de geração de cenários, foi considerada uma amostra de 11 elementos, variando-se a semente *backward* de 0 a 10.

A Figura 2.15, no primeiro gráfico, apresenta os valores de ZINF na 45^a iteração.



Figura 2.15 –ZINF na 45^a iteração - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

O segundo gráfico da Figura 2.15 e a Tabela 2.3 apresentam, para cada representante do processo de agregação de ruídos, o estimador da média, o estimador do desvio padrão e o intervalo de confiança para o ZINF, conforme apresentado na seção 9.1. Para 11 sementes, o valor crítico, considerando 95% de nível de confiança, é 2,228.

Observa-se, ao se considerar o centroide como representante do processo de agregação de ruídos:

- iii. Redução significativa no desvio padrão dos valores de ZINF na 45^a iteração.
- iv. Não haver tendência de crescimento ou redução nos valores de ZINF. Por exemplo, para a semente 0, há redução, enquanto para a semente 1 há aumento no valor de ZINF.

Tabela 2.3 – ZINF na 45^a iteração - Intervalo de Confiança (95%) - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

Mais próximo x Centroide	ZINF na 45 ^a iteração (amostra de 11 sementes <i>backward</i>)		
	Média (R\$10 ⁶)	Desvio Padrão (R\$10 ⁶)	IC (95%)
Sem Ream_mais próximo	354.534	3.864	[345.926; 363.142]
Sem Ream_centroide	367.854	1.225	[365.123; 370.584]

Observa-se redução da variabilidade dos valores de ZINF também ao longo das iterações quando se considera o centroide como o representante do processo de agregação de ruídos, ao se variar sementes *backward*, conforme pode ser visto Figura 2.16.

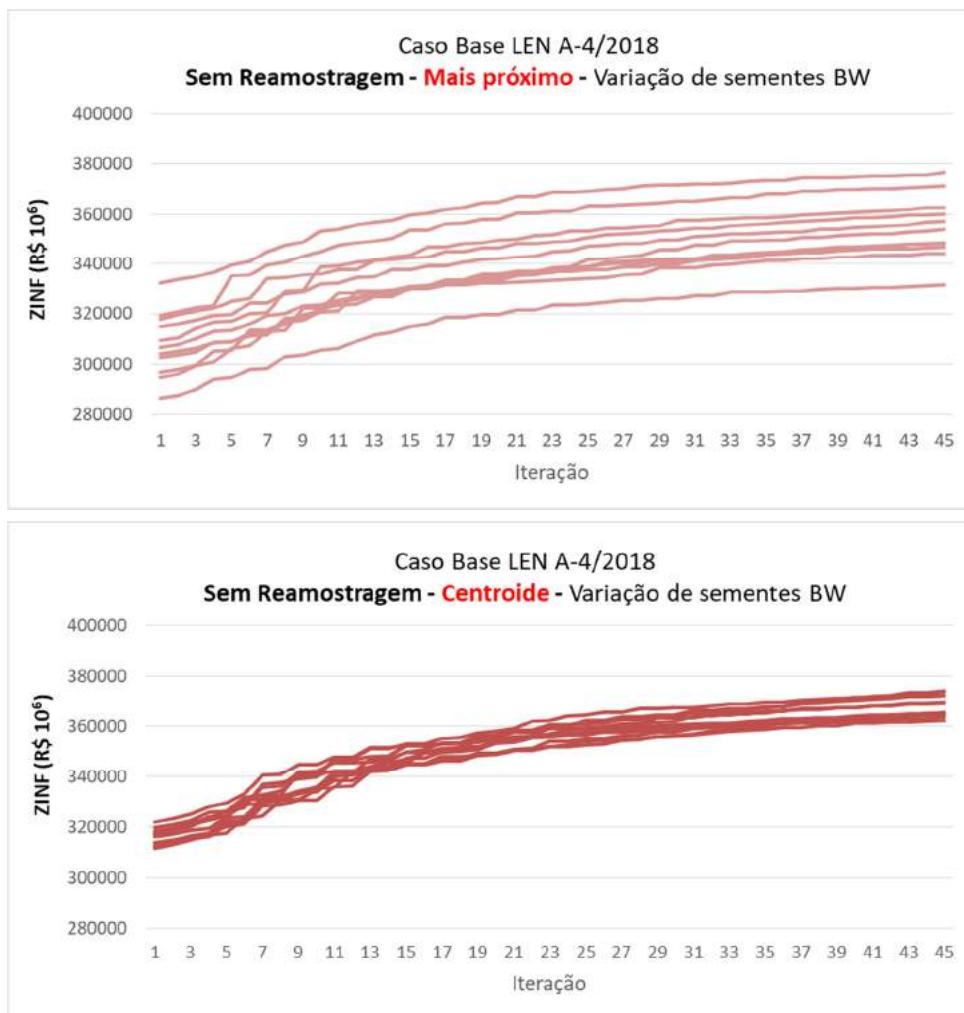


Figura 2.16 – Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da simulação final com 2.000 cenários de séries sintéticas, para cada uma das 11 sementes *backward*. Considerando ora o representante do processo de agregação de ruídos o elemento mais próximo ao centroide, ora o próprio centroide.

A Figura 2.17 apresenta o valor esperado do custo total de operação referenciado ao primeiro ano do período de planejamento. Observa-se, ao se considerar o centroide como representante do processo de agregação de ruídos:

- iii. Redução da variabilidade do custo total de operação, ao se variar sementes *backward*.
- iv. Não haver tendência de crescimento ou redução nos valores de custo total de operação.

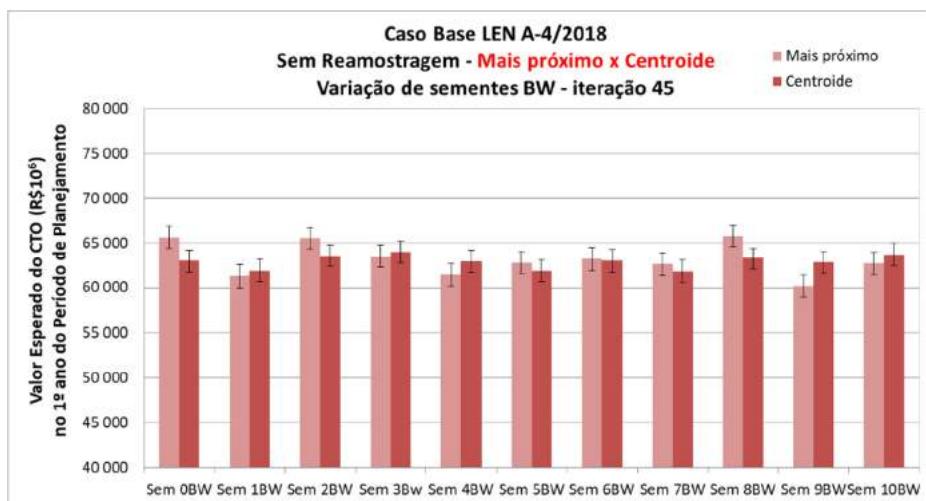


Figura 2.17 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 2.18 apresenta o diagrama de dispersão para o custo de geração térmica versus o custo de déficit. Observa-se, ao se considerar o centroide como o representante do processo de agregação de ruídos que há redução da variabilidade do custo de geração térmica. Embora nem todos os elementos da amostra sejam estatisticamente equivalentes, eles estão menos dispersos do que quando o representante é o elemento mais próximo ao centroide.

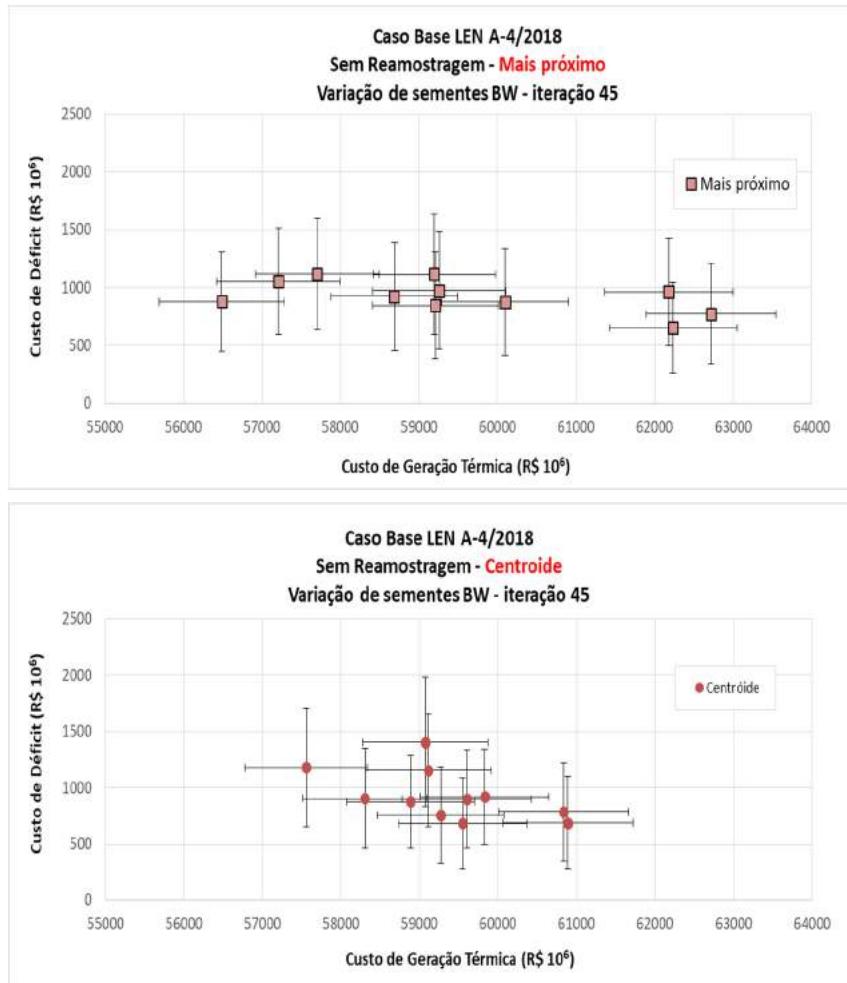


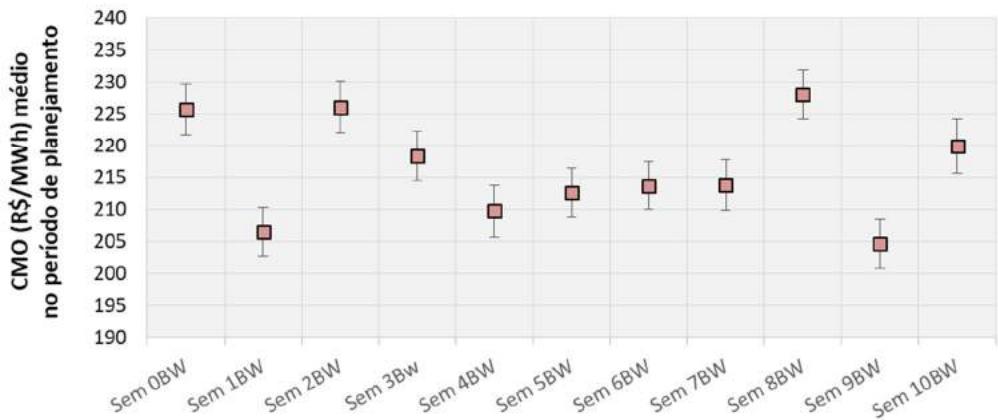
Figura 2.18 - Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam - Mais próximo x Centroíde - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 2.19 apresenta os valores de custo marginal médio no período de planejamento. A Figura 2.20 apresenta a evolução mensal dos valores dos custos marginais de operação no período de planejamento.

Observa-se, ao se considerar o centroíde como o representante do processo de agregação de ruídos:

- i. Redução dos valores e da variabilidade.
- ii. A diferença entre os limites superior e inferior, para o intervalo de confiança de 95% de uma distribuição normal, reduz de 31 R\$/MWh ($31 = 232 - 201$) para 22 R\$/MWh ($22 = 226 - 204$).

Caso Base LEN A-4/2018
SemReamostagem - Mais próximo
Variação de sementes BW - iteração 45



Caso Base LEN A-4/2018
SemReamostragem - Centroide
Variação de sementes BW - iteração 45

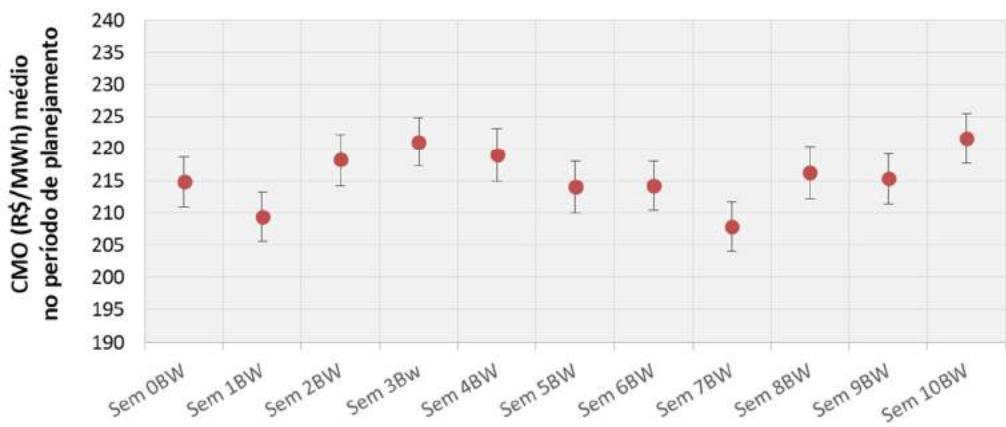


Figura 2.19 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

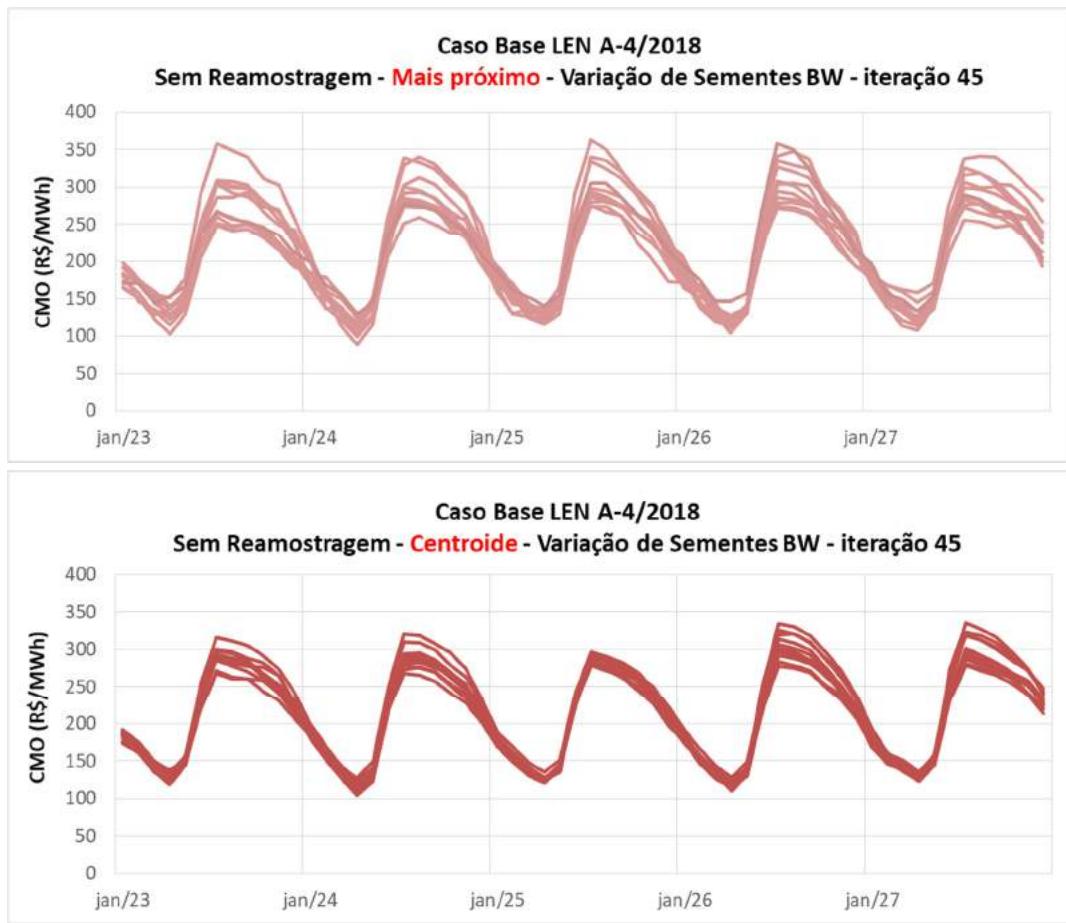


Figura 2.20 – Evolução Mensal dos Custos Marginais de Operação no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 2.21 apresenta os valores médios anuais de custo marginal de operação no período de planejamento. Observa-se redução da variabilidade dos valores anuais de CMO ao se considerar o centroíde como o representante do processo de agregação de ruídos.

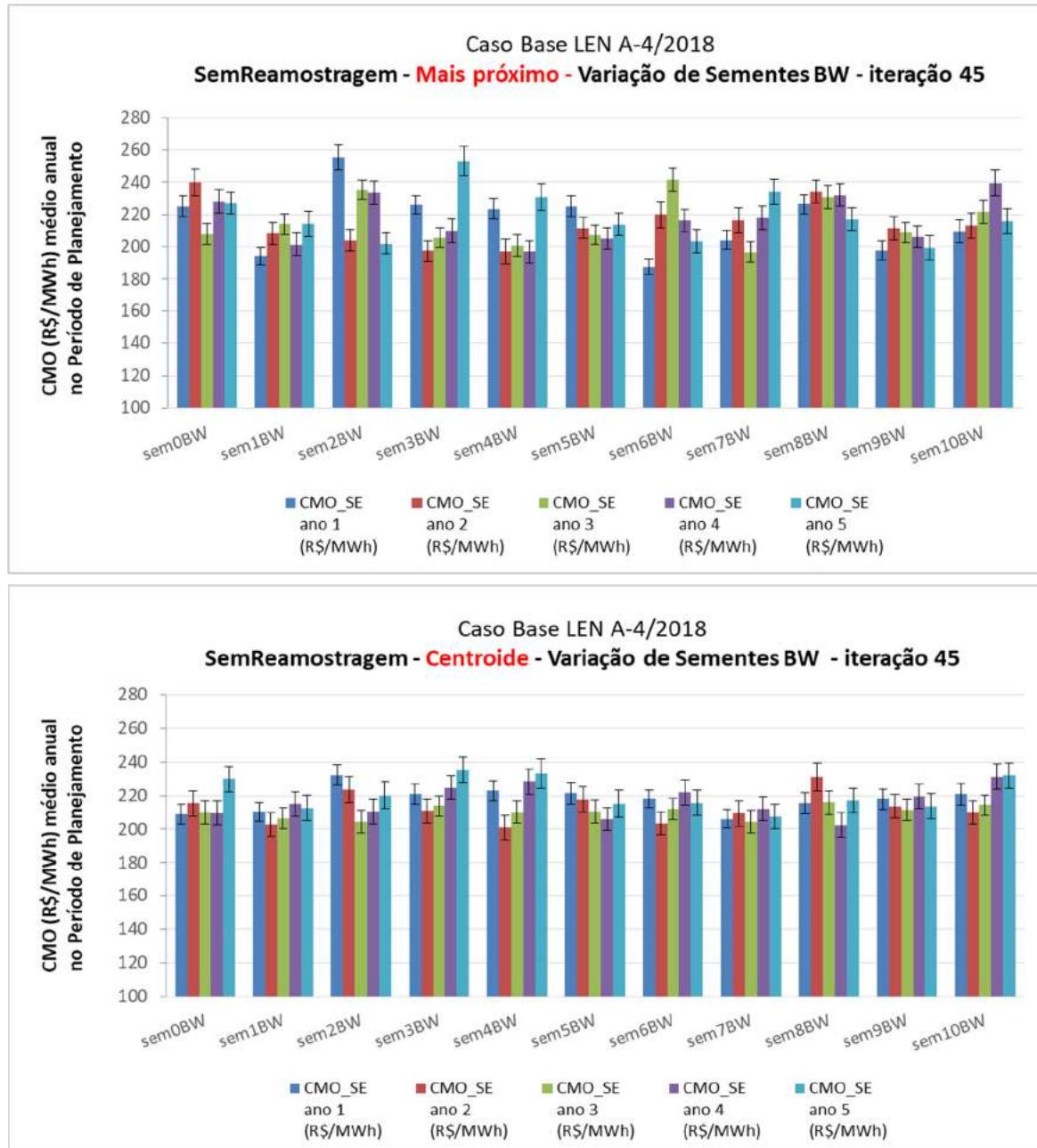


Figura 2.21 – Custo Marginal de Operação anual no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroíde - Caso Base LEN A-4/2018.

2.3. Conclusão

A consideração do centroide como representante no processo de Amostragem Seletiva (AS), em substituição ao ruído mais próximo ao centroide, resultou em uma redução na variabilidade amostral, em relação a variações da semente para a geração de cenários *backward*, observada nos resultados obtidos para o planejamento da operação, para o planejamento da expansão, em cálculos de garantia física e para a formação de preço. Portanto, GT Metodologia indica seu uso para o ano de 2020, cuja aprovação depende da decisão plenária da CPAMP. Os testes de validação dessa metodologia estão sendo realizados pela FT-NEWAVE.

3. Reamostragem dos cenários *Forward*

3.1. Metodologia

Em [10] e [11], o CEPEL apresentou duas metodologias para a reamostragem dos cenários *forward*, a reamostragem por recombinação e a reamostragem plena. Na metodologia reamostragem por recombinação, a abordagem para escolher uma nova subárvore, a cada iteração do algoritmo da PDDE durante a simulação *forward*, é manter a amostra de ruídos a cada período, porém combinando-os de forma distinta entre os períodos. Já na metodologia reamostragem plena, a cada iteração do algoritmo de PDDE são amostrados novos ruídos aleatórios para geração da subárvore *forward*. Os cenários de afluências às usinas hidroelétricas da primeira iteração são idênticos aos do processo sem reamostragem e ao processo de reamostragem por recombinação. Mas a partir das iterações seguintes de reamostragem os ruídos podem ser, e muito provavelmente o serão, diferentes, porém cada amostra representa a mesma distribuição de probabilidade. A reamostragem plena permite, naturalmente, uma representação mais abrangente das afluências às usinas hidroelétricas e aos reservatórios equivalentes de energia (REE). Um parâmetro importante neste processo é o “passo” para a reamostragem, ou seja, o intervalo entre iterações para trocar (reamostrar) a subárvore *forward*. Quanto menor for a frequência, maior será a abrangência da subárvore no final do processo iterativo, pois uma parcela maior da árvore completa terá sido visitada.

Também em [10] e [11] foram exploradas as duas metodologias de reamostragem e o passo para a reamostragem tomando-se como base que o momento da reamostragem se daria ao final de uma iteração do algoritmo de PDDE/início da próxima iteração. No modelo NEWAVE, uma iteração se inicia com uma recursão *backward*, onde são construídos cortes de *Benders* que são incorporados à função de custo futuro de cada um dos estágios do horizonte de estudo; e em seguida por uma simulação *forward* da operação do sistema a fim de se obter novos valores para as variáveis de estado níveis de armazenamento no início de cada estágio para os reservatórios equivalentes de energia ou para os reservatórios das usinas hidroelétricas. Portanto, nas metodologias utilizadas em [10] e [11], o momento da reamostragem se dá no início da recursão *backward*.

Nesse caso, supondo-se a aplicação da reamostragem a cada iteração do algoritmo de PDDE (passo1), a recursão *backward* utiliza as afluências da nova reamostragem como os valores para as variáveis de estado afluências passadas, enquanto que os valores das variáveis de estado armazenamento no início de cada estágio são decorrentes da simulação *forward* prévia que empregou as afluências da amostra de cenários anterior. Na maior parte das aplicações e para ambas as metodologias, este momento de reamostragem produziu os melhores resultados quando se adotou o passo 3, apesar de teoricamente, o passo 1 garantir uma maior abrangência da subárvore no final do processo iterativo, o que levou o grupo técnico a uma reflexão sobre o comportamento dos resultados obtidos.

Após analisar as pontuações levantadas nas reuniões do GT-Metodologia com relação ao comportamento do valor esperado de Zinf, que tende a aumentar com aplicação da reamostragem, e a qualidade esperada dos resultados para a reamostragem considerando o passo 1, o CEPEL propôs de avaliar outro momento de reamostragem [12], aqui chamado de

forward, pois a reamostragem dos cenários será realizada no início de cada simulação *forward*. O objetivo desta proposta foi investigar se os novos valores da variável de estado armazenamento nos aproveitamentos hidroelétricos no início do estágio quando produzidos com a mesma amostra de cenários de afluências que será utilizada para representar as afluências passadas na recursão *backward* fornecem resultados ainda melhores quando se aplica a reamostragem.

3.2. Sensibilidades (para subsidiar a definição do tipo de reamostragem e passo)

Nessa seção serão apresentadas as análises realizadas visando avaliar os impactos da consideração da reamostragem dos cenários *forward* nos resultados do problema de otimização, bem como definir a metodologia de reamostragem mais robusta - plena ou por recombinação.

Para a realização desses estudos, foram simulados diversos casos considerando diferentes sementes para a geração dos cenários das simulações *forward*. Para tanto, o CEPEL disponibilizou para a CPAMP para realização das análises pelo GT Metodologia, versão do modelo NEWAVE que permite variar a semente *forward*. Porém, tendo em vista que com a consideração da reamostragem no problema de otimização é esperada uma redução da variabilidade amostral, tem-se que a solução do problema é robusta a essa variação de semente, portanto, a versão a ser encaminhada para homologação da ANEEL futuramente não deverá conter essa opção.

O centroide foi adotado como representante do processo de agregação de ruídos em todos os casos simulados, devido à redução da variabilidade dos cenários da recursão *backward*.

Dentre os casos simulados, foram consideradas diferentes configurações (PMO, PLD, Garantia Física e PDE), com e sem a adoção de mecanismos de aversão ao risco.

Para casos neutros a risco, o aprimoramento da função de custo futuro ao se considerar reamostragem é diretamente identificado avaliando-se a redução do valor esperado do custo total de operação. Entretanto, para casos com CVaR, essa análise não pode ser realizada, pois quando se adota a combinação convexa entre as medidas valor esperado e CVaR na construção dos cortes de *Benders*, o valor esperado do custo de operação reflete apenas uma das duas dimensões que compõem a função objetivo do problema de otimização.

Para casos com CVaR, para se avaliar o aprimoramento da função de custo futuro ao se considerar reamostragem é necessária a análise conjunta de diversas variáveis. A análise é iniciada pelo ZINF, pois é o valor esperado do custo total de operação obtido a partir da solução dos problemas do primeiro estágio, utilizando os cenários da simulação *forward*. Cabe lembrar que o custo total de operação do primeiro estágio é majoritariamente composto pela parcela referente à consulta à função de custo futuro, que é construída utilizando as medidas valor esperado e CVaR. Para a análise dos resultados obtidos, são apresentados gráficos e tabelas com os valores de média, desvio-padrão e intervalo de confiança, considerando todas as sementes simuladas para uma dada configuração (alterando a metodologia de reamostragem e o passo).

Além disso, foi considerada como premissa para os estudos desta etapa 45 iterações fixas para a construção da política de operação.

3.2.1. PMO Julho/2014 e PMO Outubro/2018

Análise do Tipo da Reamostragem:

Após a conclusão dos estudos com o uso do centroide como representante na agregação de ruídos, foram feitas análises nos PMOs de Julho/2014 e Outubro/18, a fim de observar a comportamento da reamostragem em casos com características hidrológicas distintas.

Nesta análise, foram simulados, para cada PMO escolhido, casos com reamostragem plena e com reamostragem por recombinação. Foi feita ainda, para cada tipo de reamostragem, a variação do passo (k) da reamostragem e da semente *forward* utilizada, conforme demonstrado na Tabela 3.1 todos os casos processados foram neutros ao risco.

Tabela 3.1 – Descrição dos casos processados.

	Quantidade	Descrição
Sementes	20	
Passo	4	(1, 3, 5, 7)
PMO	2	(Jul/2014 e Out/2018)
Tipo Reamostragem	2	(Plena e Recombina)
Total de Casos	320	

Nas Figura 3.1 e Figura 3.2, observam-se menores valores de custo total de operação para a reamostragem plena em comparação com os valores obtidos com a reamostragem por recombinação. Todos dentro do intervalo de confiança.

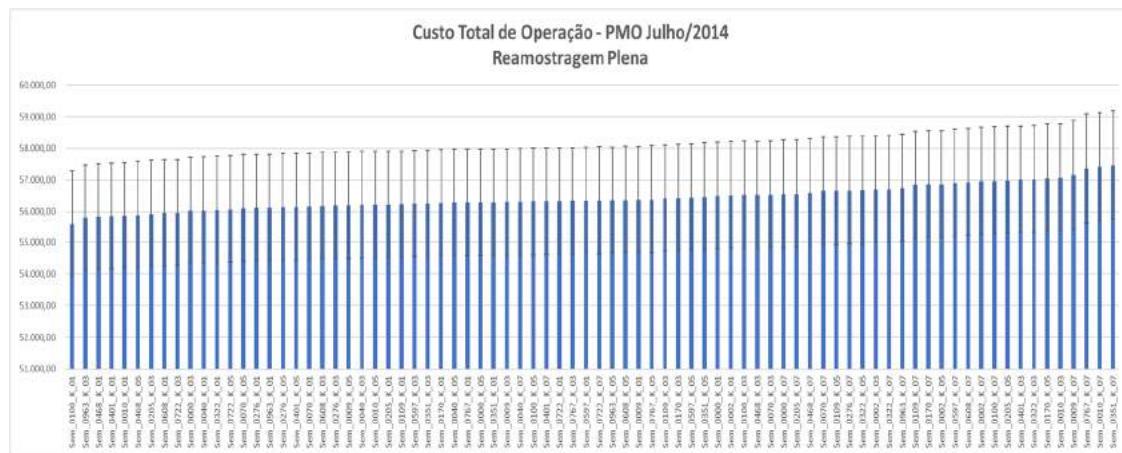


Figura 3.1 – Custo total de operação com reamostragem plena - PMO julho/2014.

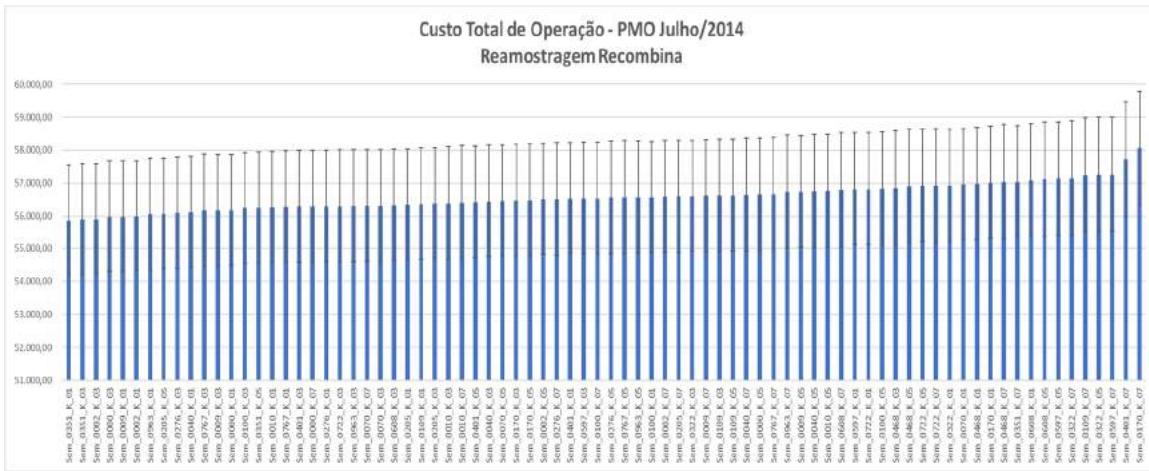


Figura 3.2 – Custo total de operação com reamostragem por recombinação - PMO julho/2014.

O mesmo comportamento é observado nas simulações com o PMO de Outubro/18, Figura 3.3 e Figura 3.4, onde a reamostragem plena possui menores valores de custo total de operação quando comparados aos valores obtidos na reamostragem por recombinação, também dentro do intervalo de confiança.

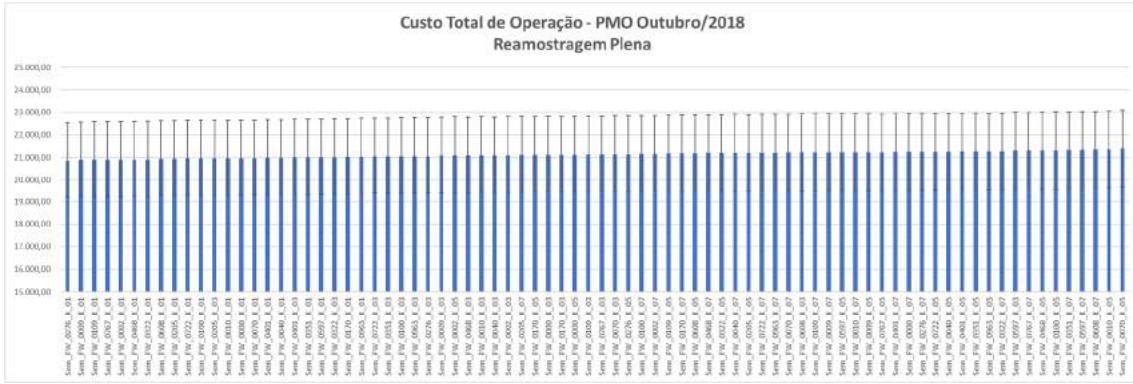


Figura 3.3 – Custo total de operação com reamostragem plena - PMO outubro/2018.



Figura 3.4 – Custo total de operação com reamostragem por recombinação - PMO outubro/2018.

A Tabela 3.2 mostra os resultados das médias do custo total de operação das 20 sementes *forward*, em cada tipo de reamostragem, por PMO, considerando os passos 1, 3 ,5 e 7 da reamostragem. Nesse momento, o objetivo foi investigar a influência do tipo de reamostragem sobre os resultados no custo total de operação.

Tabela 3.2 – Média e Desvio Padrão das 20 sementes para cada tipo de reamostragem, por PMO.

PMO	Tipo Reamostragem	Média CTO (R\$10 ⁶)	Desvio Padrão (R\$10 ⁶)	Limite Inferior	Limite Superior
Julho/2014	Recombina	56.580,59	408,29	55.780,35	57.380,83
	Plena	56.431,02	393,46	55.659,84	57.202,19
Outubro/2018	Recombina	21.215,87	145,02	20.931,63	21.500,11
	Plena	21.128,13	132,54	20.868,36	21.387,91

A partir dos estudos realizados, dada a maior diversidade de cenários percorridos com a reamostragem plena, passo 1 recomendamos sua utilização.

Análise do Passo (k):

Ao realizar a média do custo total de operação (CTO), das 20 sementes *forward*, dentro de cada passo (k) e tipo de reamostragem, observa-se que a reamostragem plena, no passo 1, possui menores valores de CTO, conforme

Figura 3.5.

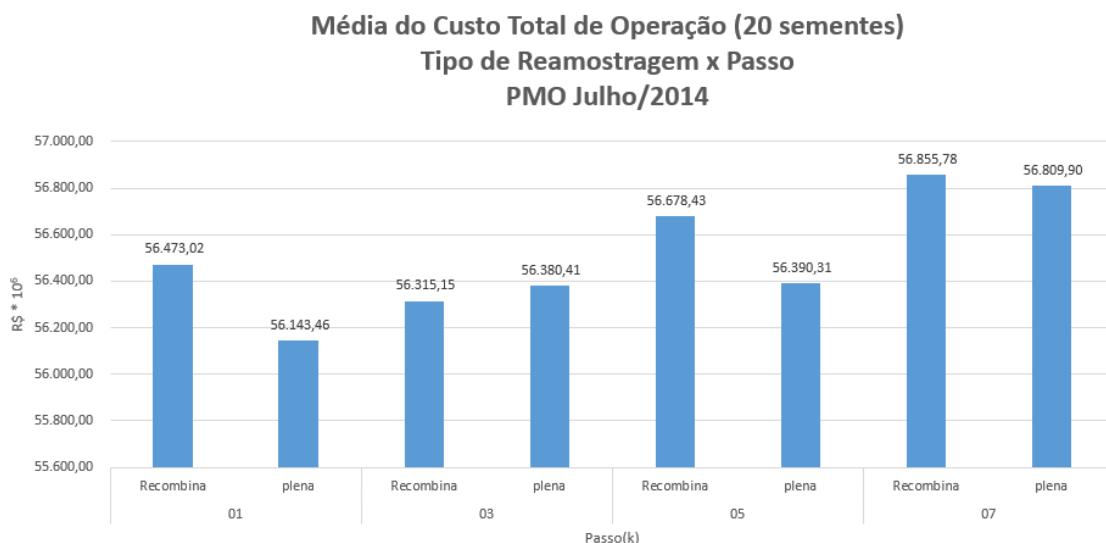


Figura 3.5 – Média do CTO das 20 sementes, por passo, por tipo de reamostragem - PMO julho/2014.

O mesmo comportamento ocorre para o PMO de outubro/2018, conforme pode-se observar na Figura 3.7

Média do Custo Total de Operação (20 sementes)
Tipo de Reamostragem x Passo
PMO Outubro/2018

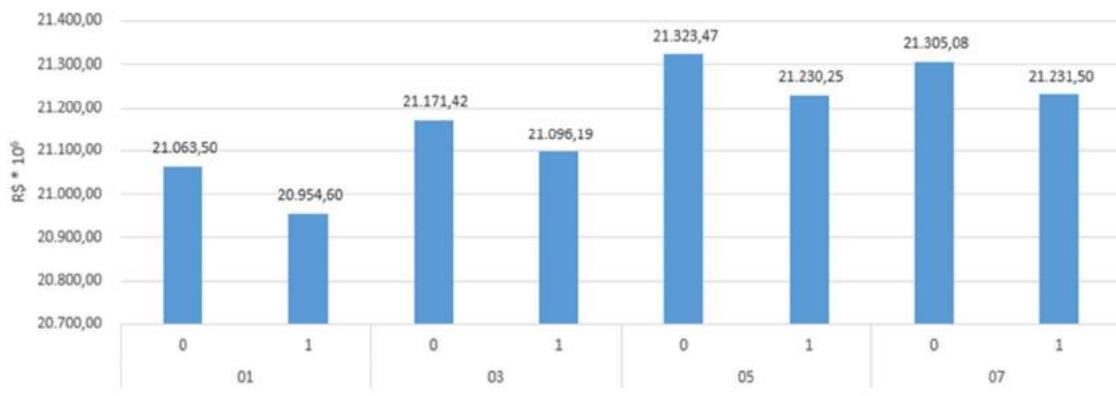


Figura 3.6 – Média do CTO das 20 sementes, por passo, por tipo de reamostragem - PMO outubro/2018.

Nas Figura 3.7 e Figura 3.8 podemos observar que, independentemente do tipo de reamostragem, o comportamento do ZINF (10^6 R\$) permanece o mesmo.

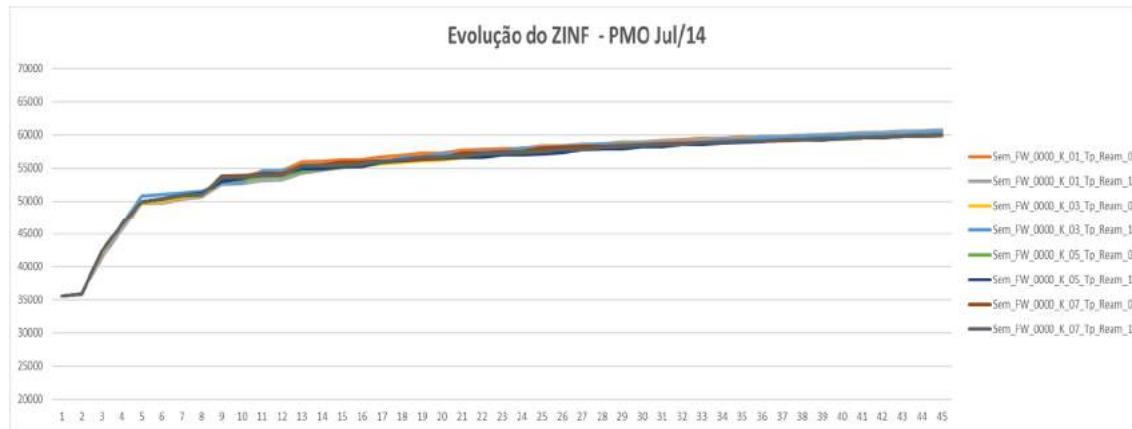


Figura 3.7 – Evolução do ZINF - PMO julho/2014 - Semente 0000.

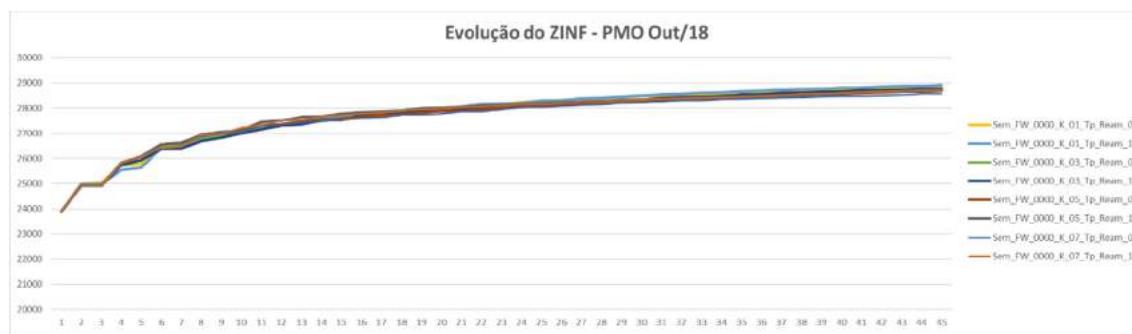


Figura 3.8 – Evolução do ZINF - PMO outubro/2018 - Semente 0000.

A Tabela 3.3 apresenta os valores de ZINF obtidos na 45^a iteração em cada PMO analisado. Embora tenham sido realizados testes considerando 20 sementes para reamostragem da *forward*, para simplificar são exibidos apenas os valores simulados com a semente *forward* padrão (0000).

Tabela 3.3 – Análise do ZINF da 45^a iteração (na semente padrão).

Análise do Passo (na Semente 000)				
	Julho/2014		Outubro/2018	
Passo	Plena	Recombina	Plena	Recombina
1	60.754,09	60.688,51	28.925,20	28.863,71
3	60.424,52	60.068,04	28.781,62	28.737,97
5	59.966,88	59.960,53	28.718,53	28.684,52
7	59.992,36	59.894,79	28.720,61	28.568,65

A partir dos estudos realizados, levando-se em conta a maior diversidade de cenários percorridos com a reamostragem plena, passo 1, sugerimos sua utilização no modelo NEWAVE.

3.2.2. PLD Junho/2018

Nessa seção serão apresentadas as análises e os resultados da aplicação dos métodos de reamostragem de cenários *forward*, para um caso do Preço da Liquidação das Diferenças (PLD) que considerou 8 sementes diferentes para cada um dos passos e tipo de reamostragem, 45 iterações fixas, 12 REEs, 200 cenários *forward*, 20 aberturas *backward* e o CVaR com parametrização (50,40). Todas as sensibilidades aqui apresentadas já consideram o aprimoramento do momento da reamostragem na *forward*.

Como referência, tem-se o caso do PLD de junho de 2018 sem reamostragem e com centroide, no qual também foram considerados 45 iterações fixas, 12 REEs, 200 cenários *forward*, 20 aberturas *backward* e CVaR com parametrização (50,40).

Avaliação do ZINF

A Figura 3.9 apresenta os valores de ZINF na 45^a iteração para o caso do PLD de junho/2018 para os casos sem reamostragem e com centroide, com reamostragem plena e com reamostragem por recombinação, ambos considerando o uso do centroide, utilizando 8 valores diferentes de semente (s0, s100, s200, s300, s400, s500, s600 e s1000). Ressalta-se que o caso de referência considera o uso do centroide pois, conforme apresentado na seção 2, o uso dessa funcionalidade contribuiu para a redução da inflexão do CMO ao longo dos primeiros meses do horizonte de simulação.

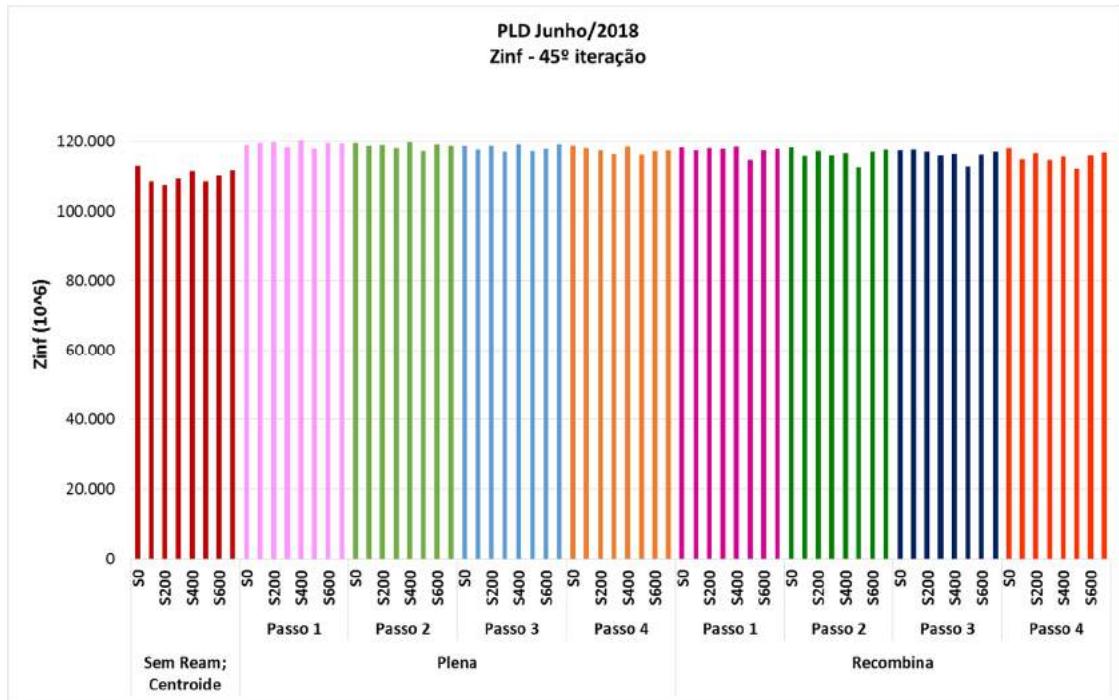


Figura 3.9 – PLD Junho/2018 - Valor do Zinf na 45ª iteração.

Assim, analisando os resultados apresentados, observa-se uma menor variabilidade nos valores de ZINF para os casos que consideram o uso da reamostragem plena e por recombinação, em relação aos casos que não consideraram a reamostragem.

Esse efeito é mais perceptível ao avaliarmos os resultados do valor esperado e do desvio padrão de ZINF na 45ª iteração para as 8 sementes utilizadas, considerando a reamostragem plena e a reamostragem por recombinação, além do caso sem reamostragem e com centroide. A Tabela 3.4 apresenta esses resultados e é possível observar que o desvio padrão é menor ao se considerar a reamostragem plena.

Tabela 3.4 – PLD junho/2018 - Valor esperado e desvio padrão para o estimador de Zinf na 45ª iteração para as 8 sementes de cada amostra.

Tipos de reamostragem	Estimador de ZINF (R\$ 10 ⁶)		
	Valor esperado	Desvio Padrão	IC (95%)
Sem Ream. + Centroide	109.941	1.871	[108.377; 111.505]
Plena P1 + Centroide	119.088	760	[118.453; 119,723]
Plena P2 + Centroide	118.652	796	[117.986; 119.317]
Plena P3 + Centroide	118.143	803	[117.472; 118.814]
Plena P4 + Centroide	117.428	853	[116.715; 118,142]
Recombina P1 + Centroide	117.455	1.205	[116.448; 118.463]
Recombina P2 + Centroide	116.355	1.717	[114.920; 117.791]
Recombina P3 + Centroide	116.272	1.556	[114.972; 117.593]
Recombina P4 + Centroide	115.546	1.771	[114.066; 117.027]

Na Figura 3.10 a seguir são apresentados os valores de ZINF por iteração para cada passo (01, 02, 03 e 04) e tipo de reamostragem, além dos resultados para os casos sem reamostragem com centroide (linhas tracejadas).

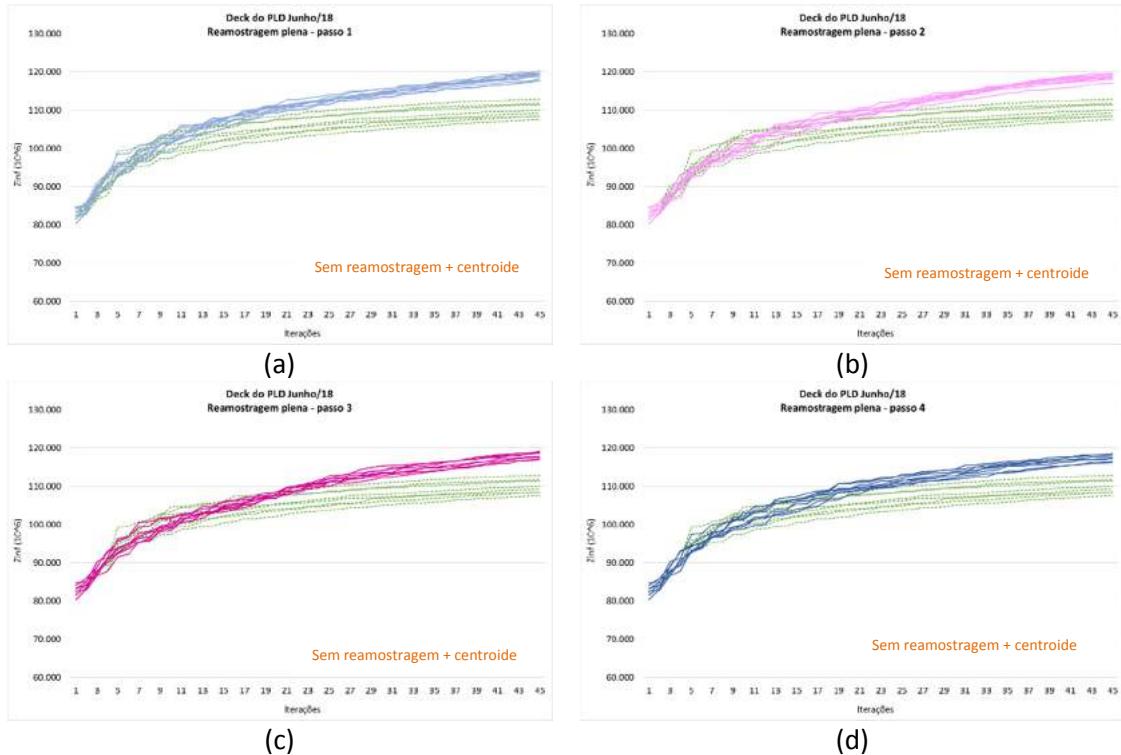


Figura 3.10 – PLD junho/2018 - Valores de Zinf por iteração para as 8 sementes com reamostragem plena.

Analizando os resultados, observa-se uma menor dispersão ao usar a reamostragem plena. Para os casos sem reamostragem nota-se uma tendência de estabilidade dos valores de ZINF, a partir da 20^a iteração, em média. Esse comportamento não é observado nos casos com reamostragem, para esses casos na 20^a iteração ainda se observa uma tendência de subida do ZINF, o que indica que a qualidade da FCF está melhorando.

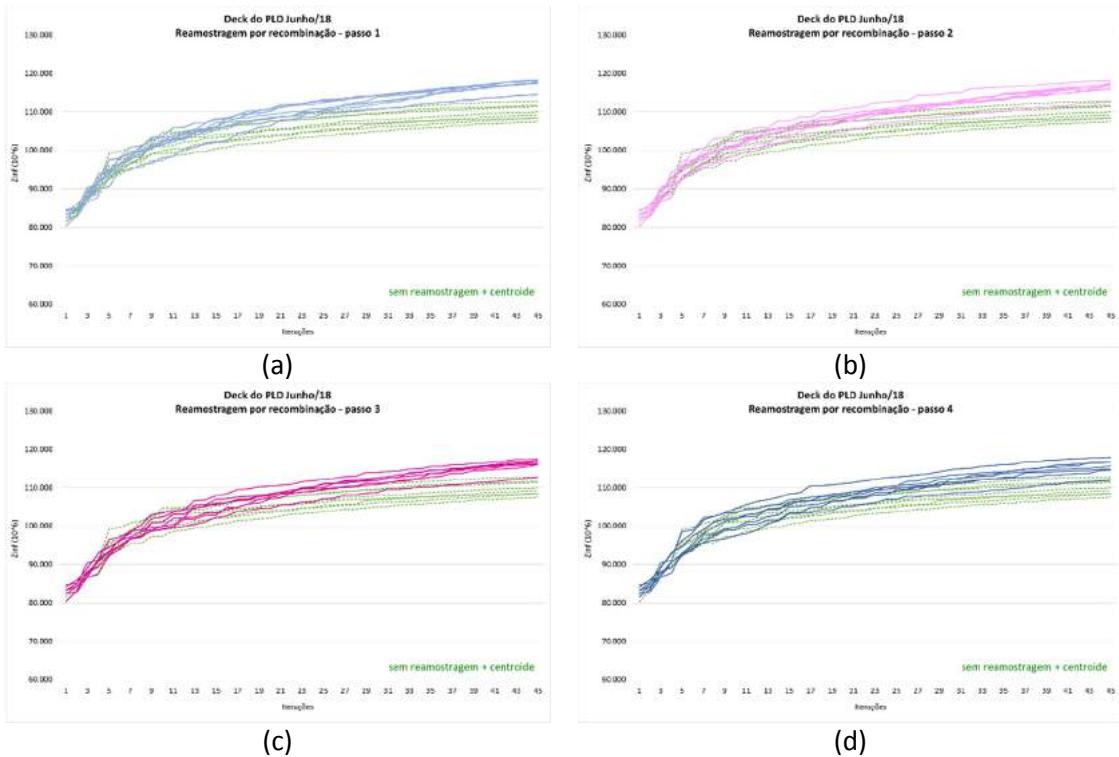


Figura 3.11 – PLD junho/2018 - Valores de Zinf por iteração para as 8 sementes com reamostragem por recombinação.

Avaliação da variabilidade do Custo Total da Operação

A Figura 3.12 apresenta os resultados do custo total da operação para o deck do PLD de junho/2018, considerando a aplicação das técnicas de reamostragem plena e por recombinação e o centroide, para os passos 1, 2, 3 e 4 com os seus respectivos conjuntos de sementes. Como referência estão os casos sem reamostragem com centroide e seus respectivos conjuntos de sementes. Ressalta-se que todos os casos foram simulados considerando a configuração com 12 REEs e os parâmetros do CVaR (50,40).

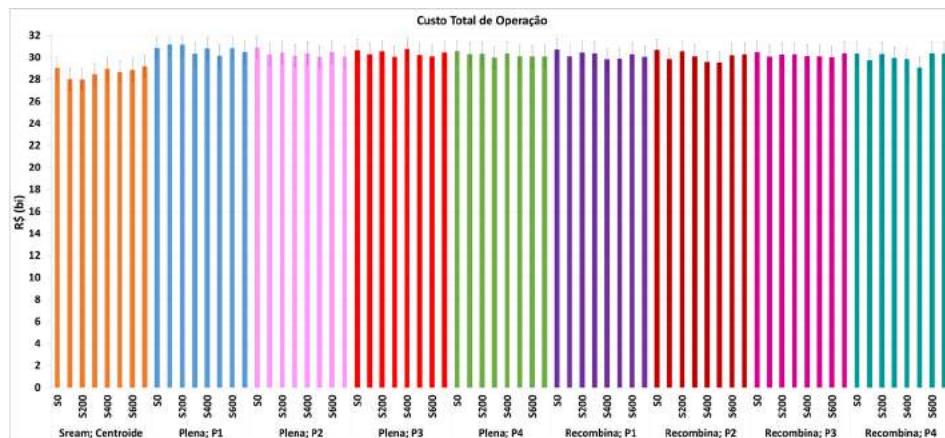


Figura 3.12 – PLD junho/2018 - Custo total da operação.

Analizando os resultados do gráfico, observa-se que o custo total da operação dos passos da reamostragem plena possuem menor variabilidade quando comparados aos resultados da reamostragem por recombinação. Além disso, observa-se um aumento no custo total de operação quando se usa o aprimoramento da reamostragem e do centroide concomitantemente.

Gráfico de dispersão custo da geração térmica x custo do déficit

A Figura 3.13 apresenta o gráfico de dispersão, também conhecido como a Fronteira de Pareto, que avalia os resultados do custo da geração térmica e do custo do déficit, para o caso do PLD de junho/2018, considerando a reamostragem por recombinação e o centroide para os passos 1, 2, 3 e 4. O caso de referência considera o uso do centroide sem a reamostragem. O gráfico, também, apresenta o desvio padrão do custo da geração térmica, para cada um dos passos avaliados, além do desvio padrão da mesma variável para os casos sem reamostragem com centroide.

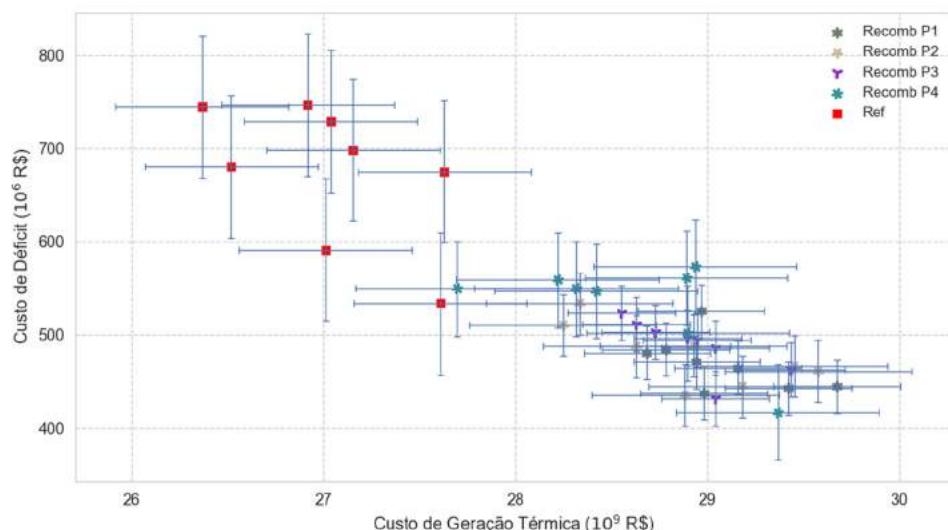


Figura 3.13 – PLD Junho/2018 - Gráfico de dispersão para a reamostragem por recombinação com desvio padrão do custo total da geração térmica do SIN.

Já a Figura 3.14 apresenta o gráfico de dispersão que avalia os resultados do custo da geração térmica e do custo do déficit, para o caso do PLD de Junho/2018, considerando a reamostragem plena para os passos 1, 2, 3 e 4, como referência tem-se os casos sem reamostragem com centroide. Cada conjunto de pontos representa um dos passos indicados na legenda e suas respectivas sementes. No gráfico, também, há a informação do desvio padrão do custo da geração térmica, para cada passo e seu respectivo conjunto de sementes.

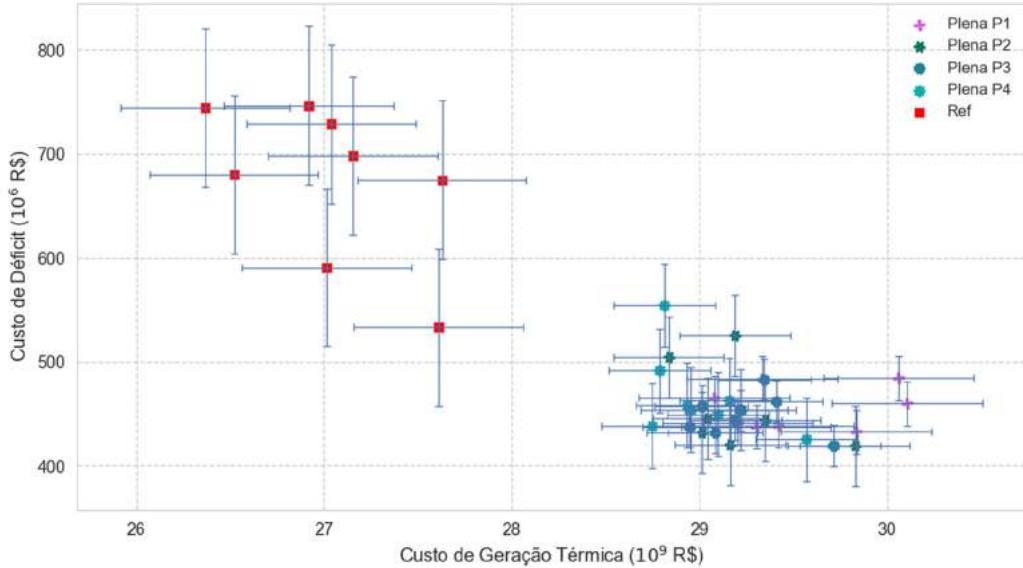


Figura 3.14 – PLD junho/2018 - Gráfico de dispersão para a reamostragem plena com desvio padrão do custo total da geração térmica do SIN.

Na Figura 3.14 observa-se que há uma menor variabilidade dos resultados da reamostragem plena. No gráfico é possível observar que o custo da geração térmica, para um determinado passo na reamostragem plena, não se altera muito em função da semente escolhida. Avaliando os resultados da reamostragem por recombinação, para um determinado passo e seu respectivo conjunto de sementes, os resultados da geração térmica são mais dispersos.

Avaliação do CMO

Complementando a avaliação dos resultados apresentados ao longo dessa seção, são apresentados os resultados da trajetória do PLD do deck de junho/2018 para submercados sudeste (SE/CO) e nordeste (NE), considerando tanto a reamostragem por recombinação quanto a reamostragem plena.

A Figura 3.15 apresenta as curvas de trajetória do CMO ao longo do horizonte de operação do modelo Newave, para cada um dos passos e seus respectivos conjuntos de sementes, considerando o uso da técnica de reamostragem por recombinação, para o submercado sudeste.

Observa-se que há um comportamento mais estável do CMO ao se considerar a reamostragem por recombinação em relação ao caso sem reamostragem com centroide. Adicionalmente, é notável uma elevação no custo do CMO nos dois primeiros anos do horizonte de planejamento. Esse mesmo comportamento, é identificado nos gráficos da Figura 3.16 que apresentam o comportamento do CMO para a reamostragem por recombinação do submercado Nordeste.

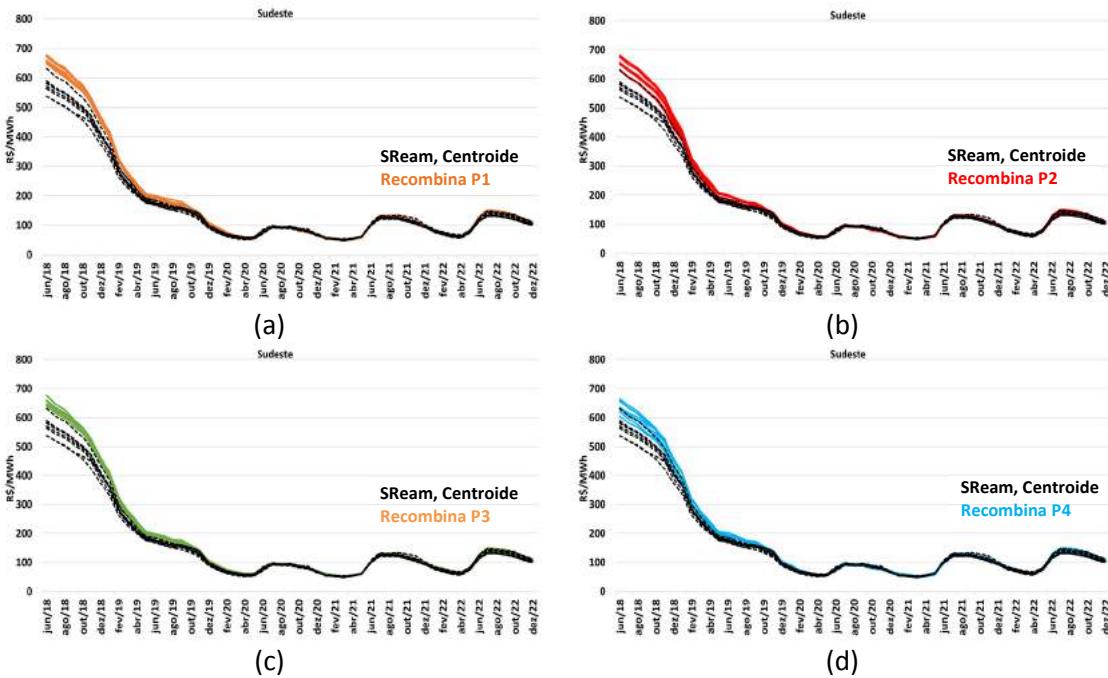


Figura 3.15 – PLD Junho/2018 - Reamostragem por recombinação: trajetória do CMO do submercado Sudeste.

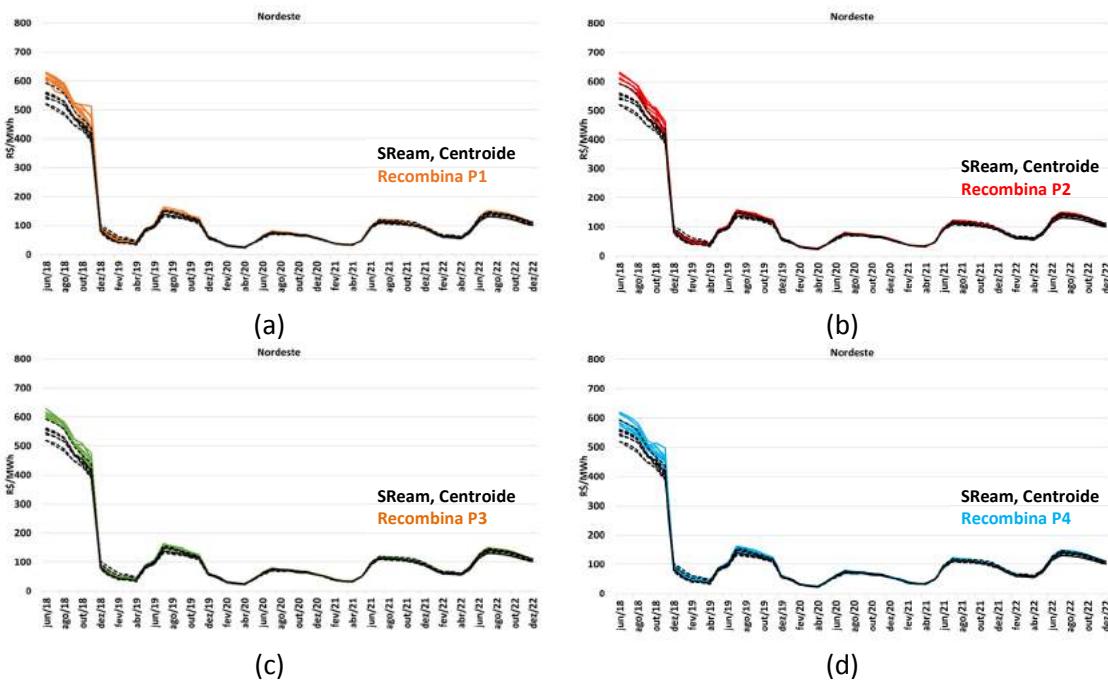


Figura 3.16 – PLD Junho/2018 - Reamostragem por recombinação: Trajetória do CMO do submercado Nordeste.

Por sua vez, a Figura 3.17 apresenta as curvas de trajetória do CMO ao longo do horizonte de operação do modelo Newave, para cada um dos passos e seus respectivos conjuntos de sementes, considerando o uso da técnica de reamostragem plena, para o submercado Sudeste.

Na Figura 3.17 é possível identificar que a reamostragem plena leva a um comportamento mais estável do CMO quando comparado com o uso da reamostragem por recombinação. Independente da semente considerada, o valor do CMO encontrado é muito similar. Esse comportamento é mais perceptível se forem comparados os gráficos da Figura 3.17 e da Figura

3.15, para os passos 2 e 4. Adicionalmente, é notável uma elevação no custo do CMO nos dois primeiros anos do horizonte de planejamento.

O mesmo comportamento descrito nos parágrafos anteriores, é identificado nos gráficos da Figura 3.18 que apresentam o comportamento do CMO para a reamostragem plena no submercado Nordeste.

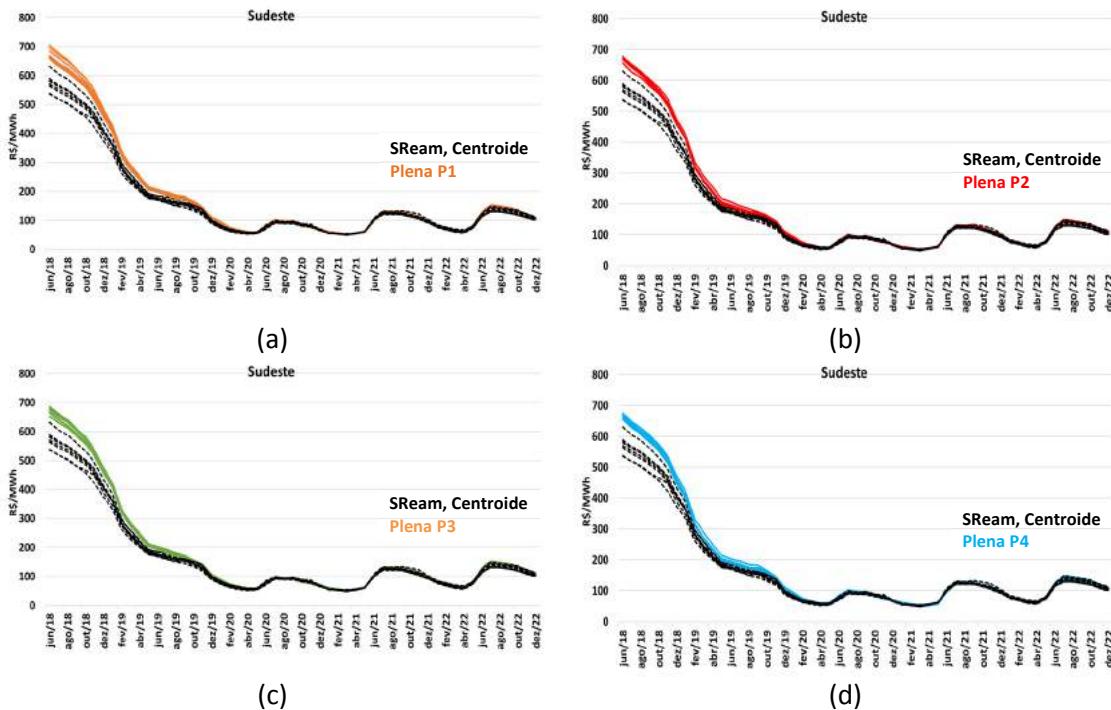


Figura 3.17 – PLD Junho/2018 - Reamostragem plena: trajetória do CMO do submercado Sudeste.

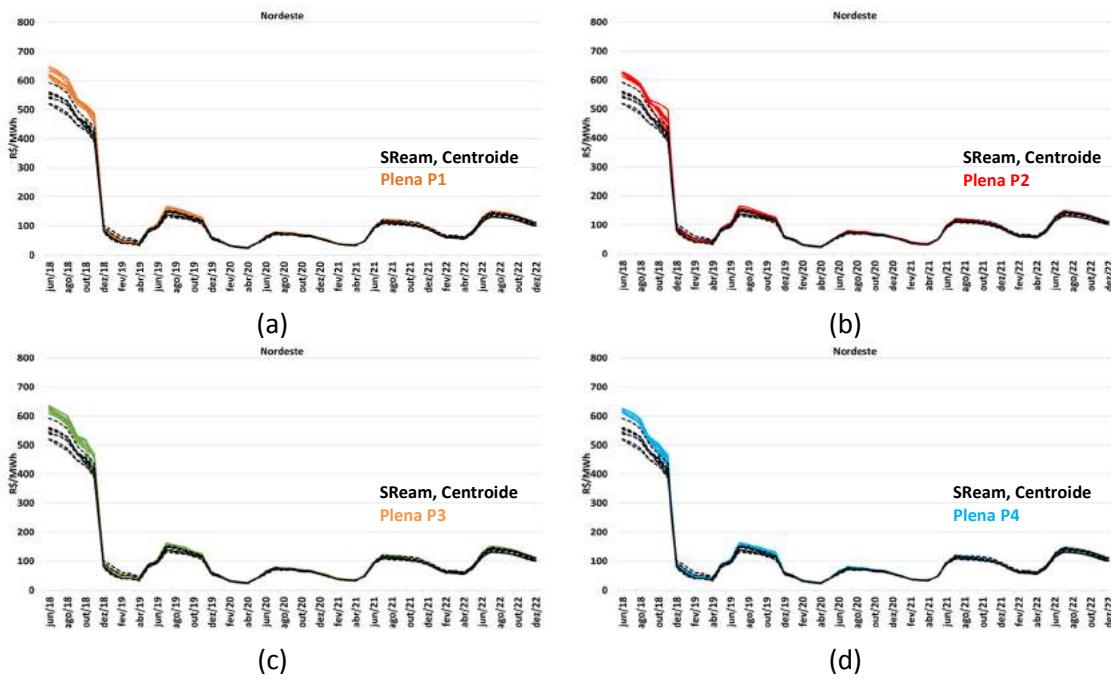


Figura 3.18 – PLD Junho/2018 - Reamostragem plena: trajetória do CMO do submercado Nordeste.

Com os resultados apresentados ao longo dessa seção, observa-se que a reamostragem plena mostrou resultados mais estáveis em relação a variabilidade do Zinf, o custo total da operação, a fronteira de Pareto (Custo do Déficit X Custo da Geração Térmica) e CMO. Adicionalmente, com o passo 1 é possível visitar diferentes cenários a cada iteração, o que resulta em uma função de custo futuro (FCF) de melhor qualidade.

Avaliação dos resultados do DECOMP

A Figura 3.19 apresenta os valores de CMO obtidos pelo modelo DECOMP para todas as semanas operativas do mês de Junho de 2018, comparando os resultados do caso oficial (20 aberturas *backward*, critério de parada vigente, sem reamostragem e centroide) com os casos que consideraram o uso da reamostragem plena, passo 1, semente 0 e centroide, pois esse tipo de reamostragem e passo apresentou resultados mais robustos na seção anterior que avaliou o uso dos tipos de metodologia e seus respectivos passos.

Avaliando os gráficos da Figura 3.19 observa-se, de modo geral, que há uma elevação nos valores do PLD em todos os submercados quando consideram-se os aprimoramentos metodológicos da reamostragem e do uso do centroide. De forma complementar, a Figura 3.20 apresenta os resultados para a geração térmica, onde também é possível observar que há uma elevação no aumento da geração térmica no período considerado.

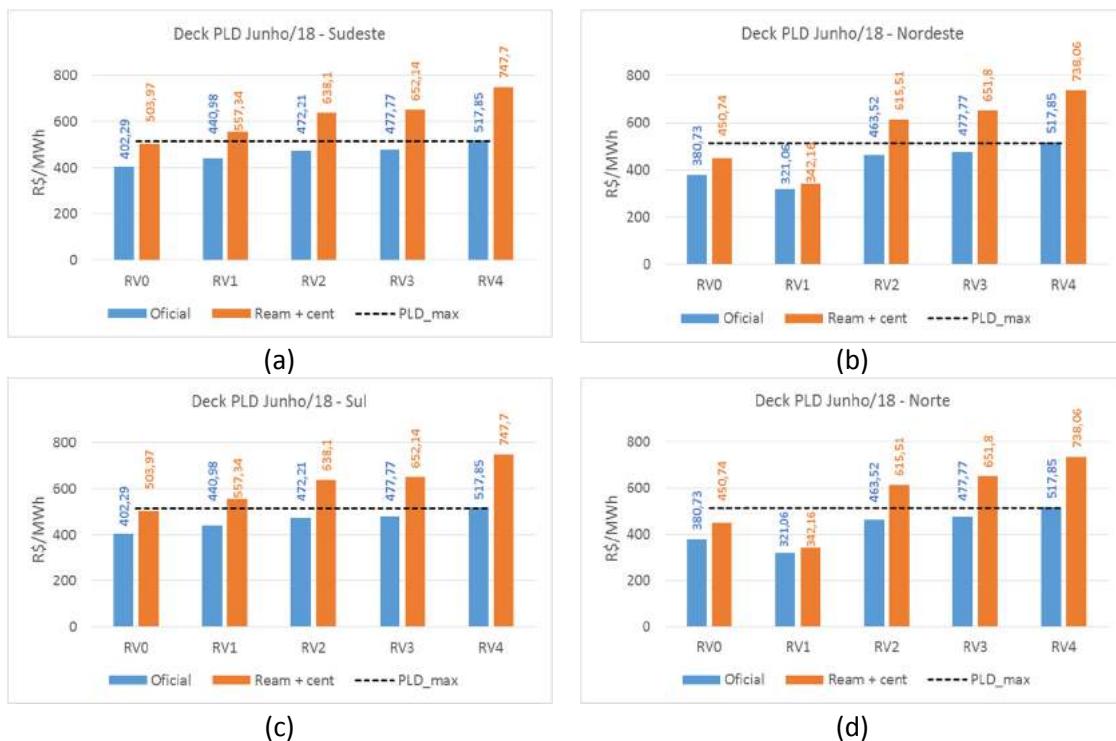


Figura 3.19 – Avaliação do efeito da reamostragem no PLD no modelo DECOMP, no mês de junho/2018 para todas as semanas operativas.

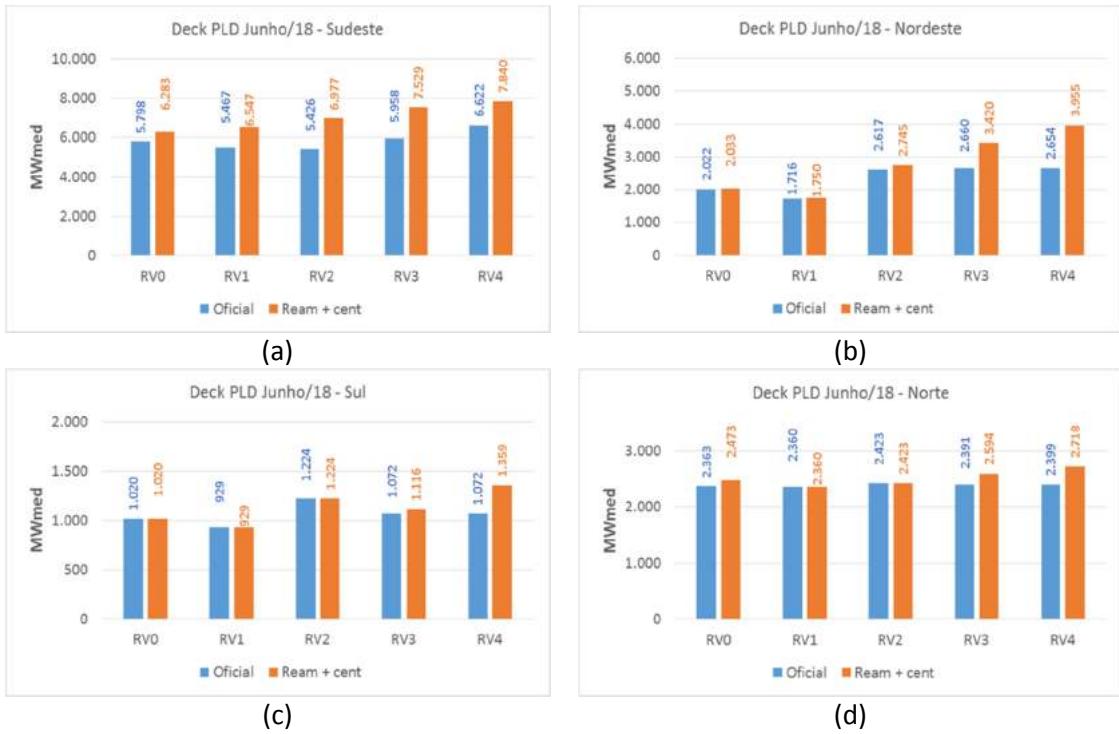


Figura 3.20 – Avaliação do efeito da reamostragem na geração térmica no modelo DECOMP, no mês de junho/2018 para todas as semanas operativas.

3.2.3. PDE 2026

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o modelo NEWAVE para um caso de Plano Decenal de Energia ao se aplicar os métodos de reamostragem da *forward* descritos anteriormente.

O caso de referência utilizado é o PDE 2026 (1.1)[16], no qual são considerados 11 reservatórios equivalentes de energia, CVaR com parametrização (50,40), 200 simulações *forward* e 20 aberturas para as recusões *backward* utilizadas na construção da política de operação. O centroide foi considerado como o representante do processo de agregação de ruídos.

A fim de definir a metodologia de reamostragem da *forward* mais robusta - plena ou por recombinação - e a frequência em que os cenários serão reamostrados (o passo da reamostragem), o caso de referência foi executado na versão 25.6 do modelo NEWAVE, considerando a reamostragem realizada no momento da *forward*, com 45 iterações fixas e variando-se a semente inicial *forward*. Para cada tipo de reamostragem da *forward*, foram considerados os passos 1, 2 e 3 e foi considerada uma amostra de 11 elementos, variando-se a semente *forward* de 0 a 10.

A Figura 3.21, no primeiro gráfico, apresenta os valores de ZINF na 45^a iteração, sem a consideração de reamostragem (SemReam); com reamostragem plena (Plena) e com reamostragem por recombinação (Recomb) aplicadas a cada iteração (P01), a cada duas iterações (P02) e a cada três iterações (P03).

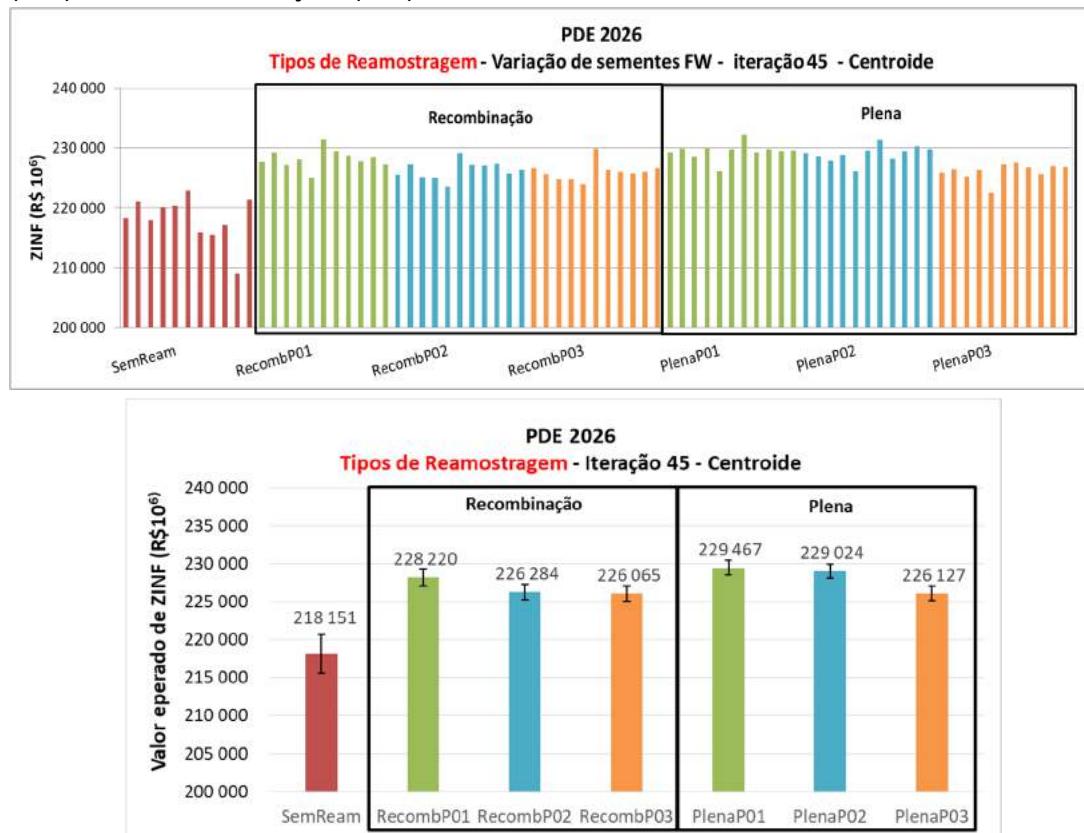


Figura 3.21 – ZINF na 45^a iteração - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.

O gráfico que se refere ao valor esperado de Zinf na Figura 3.21 bem como a Tabela 3.5 apresentam o estimador da média, o estimador do desvio padrão e o intervalo de confiança para o ZINF, conforme apresentado na seção 9.1. Para 11 sementes, o valor crítico, considerando 95% de nível de confiança, é 2,228.

Observa-se:

- i. Ao se considerar reamostragem da *forward*, os valores de ZINF na 45ª iteração são estatisticamente superiores aos valores obtidos nos casos sem reamostragem. Isso evidencia aprimoramento na função de custo futuro, ao se considerar a reamostragem da *forward*.
- ii. Redução na variabilidade dos valores de ZINF na 45ª iteração ao se considerar reamostragem da *forward*.
- iii. A reamostragem plena tende a apresentar menor variabilidade que a reamostragem por recombinação, independente do passo.
- iv. O estimador da média de ZINF na 45ª iteração é estatisticamente equivalente para PlenaP01, PlenaP02 e RecombP01.

Tabela 3.5 – ZINF na 45ª iteração - Intervalo de Confiança (95%) - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.

Tipos de Reamostragem	ZINF na 45ª iteração (amostra de 10 sementes <i>forward</i>)		
	Média (R\$10⁶)	Desvio Padrão (R\$10⁶)	IC (95%)
Sem Reamostragem	218.151	1.153	[215.582; 220.721]
Recombinação – Passo01	228.220	493	[227.121; 229.318]
Recombinação – Passo02	226.284	465	[225.249; 227.320]
Recombinação – Passo03	226.065	460	[225.041; 227.089]
Plena – Passo01	229.467	426	[228.519; 230.416]
Plena – Passo02	229.024	407	[228.116; 229.932]
Plena – Passo03	226.127	427	[225.176; 227.077]

A conclusão acima se mantém ao longo das iterações, conforme pode ser visto Figura 3.22.

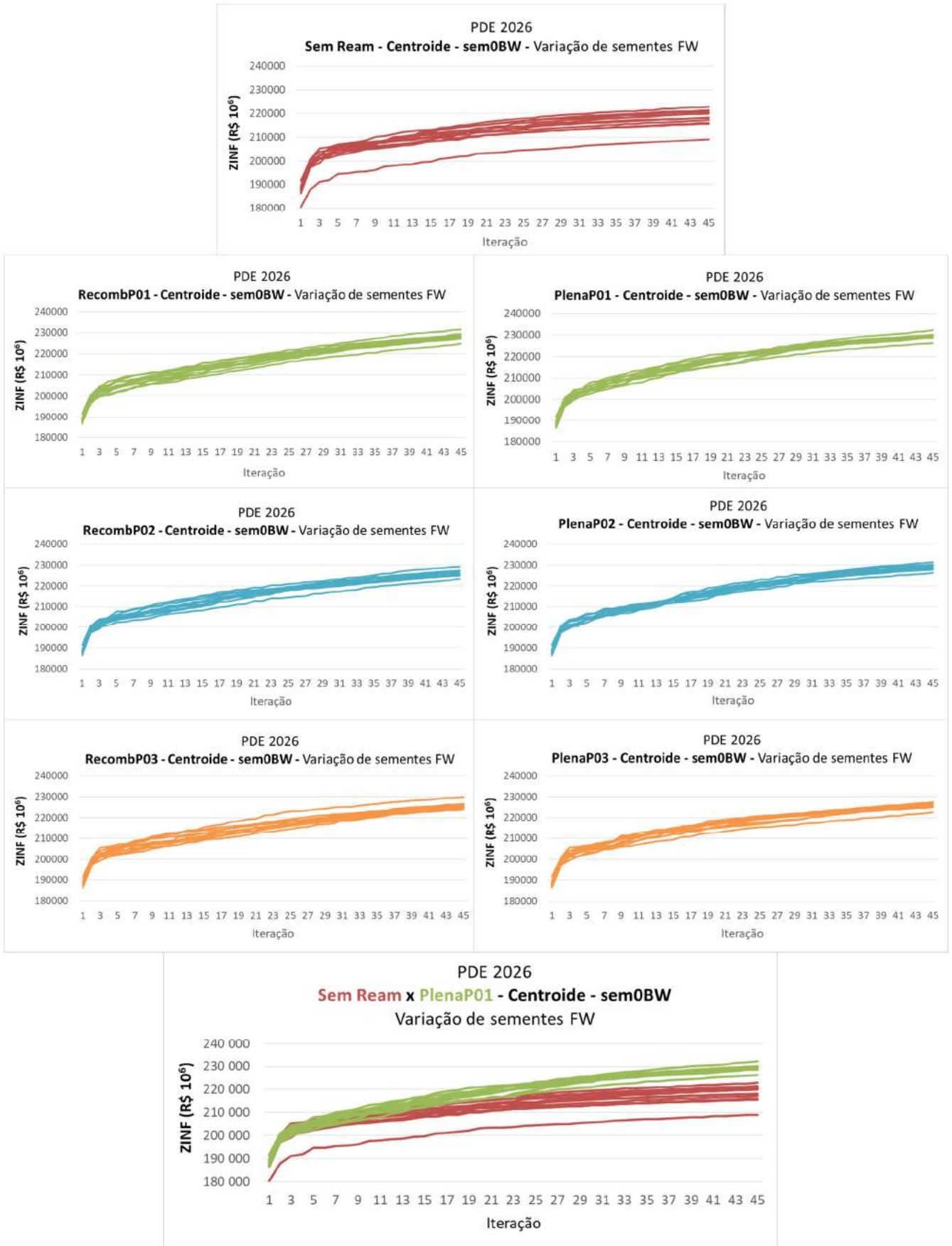


Figura 3.22 – Valores de ZINF ao longo das iterações - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da simulação final com 2.000 cenários de séries sintéticas, para cada uma das 11 sementes *forward*. Considerando reamostragem plena (Plena) e reamostragem por recombinação (Recomb) aplicadas a cada iteração (P01), a cada duas iterações (P02) e a cada três iterações (P03). Também são apresentados os resultados sem a consideração de reamostragem (SemReam).

A Figura 3.23 apresenta o valor esperado do custo total de operação referenciado ao primeiro ano do período de planejamento. Observa-se que o valor médio do custo total de operação apresenta um discreto aumento ao se considerar reamostragem, o que seria um resultado pouco intuitivo (dado que a função objetivo do modelo é minimizar o custo de operação), entretanto, cabe lembrar que em todos esses casos foi considerado CVaR com parametrização (50,40).

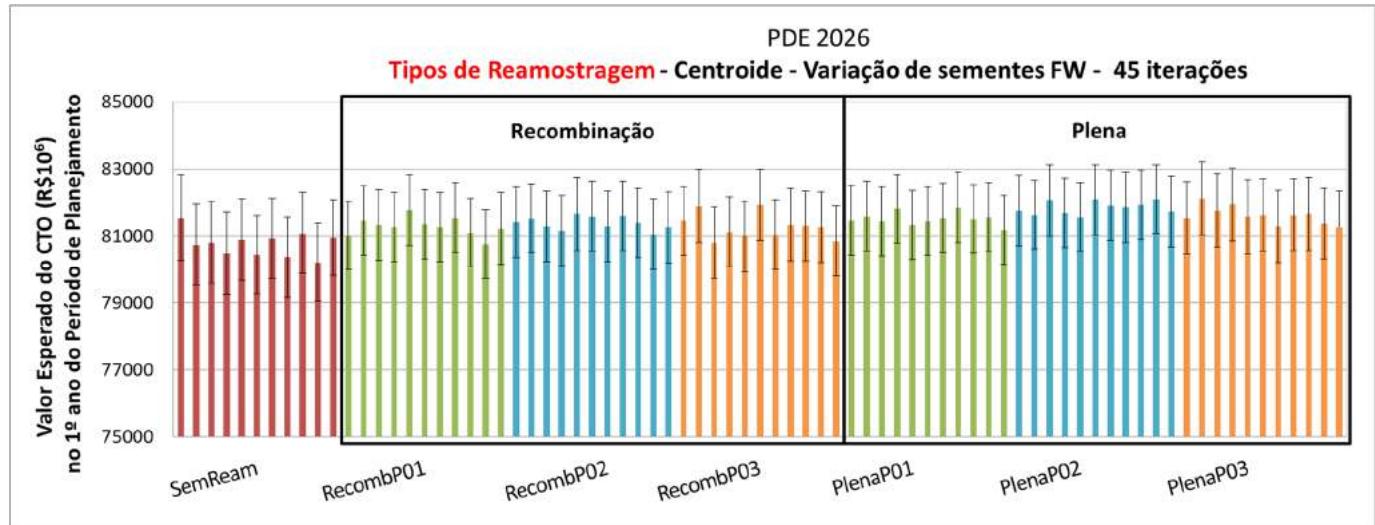


Figura 3.23 – Valor esperado do Custo Total de Operação - Tipos de Reamostragem - Centroide - PDE 2026.

Na Figura 3.24, são apresentados os diagramas de dispersão para o custo de geração térmica versus o custo de déficit.

Observa-se ao se considerar reamostragem dos cenários gerados para simulação *forward*:

- iii. Redução da variabilidade do custo de déficit.
- iv. Redução da variabilidade do custo de geração térmica. Em particular, a reamostragem plena apresenta menor variabilidade que a reamostragem por recombinação.
- v. Redução do custo de déficit.
Tendência de aumento do custo de geração térmica.

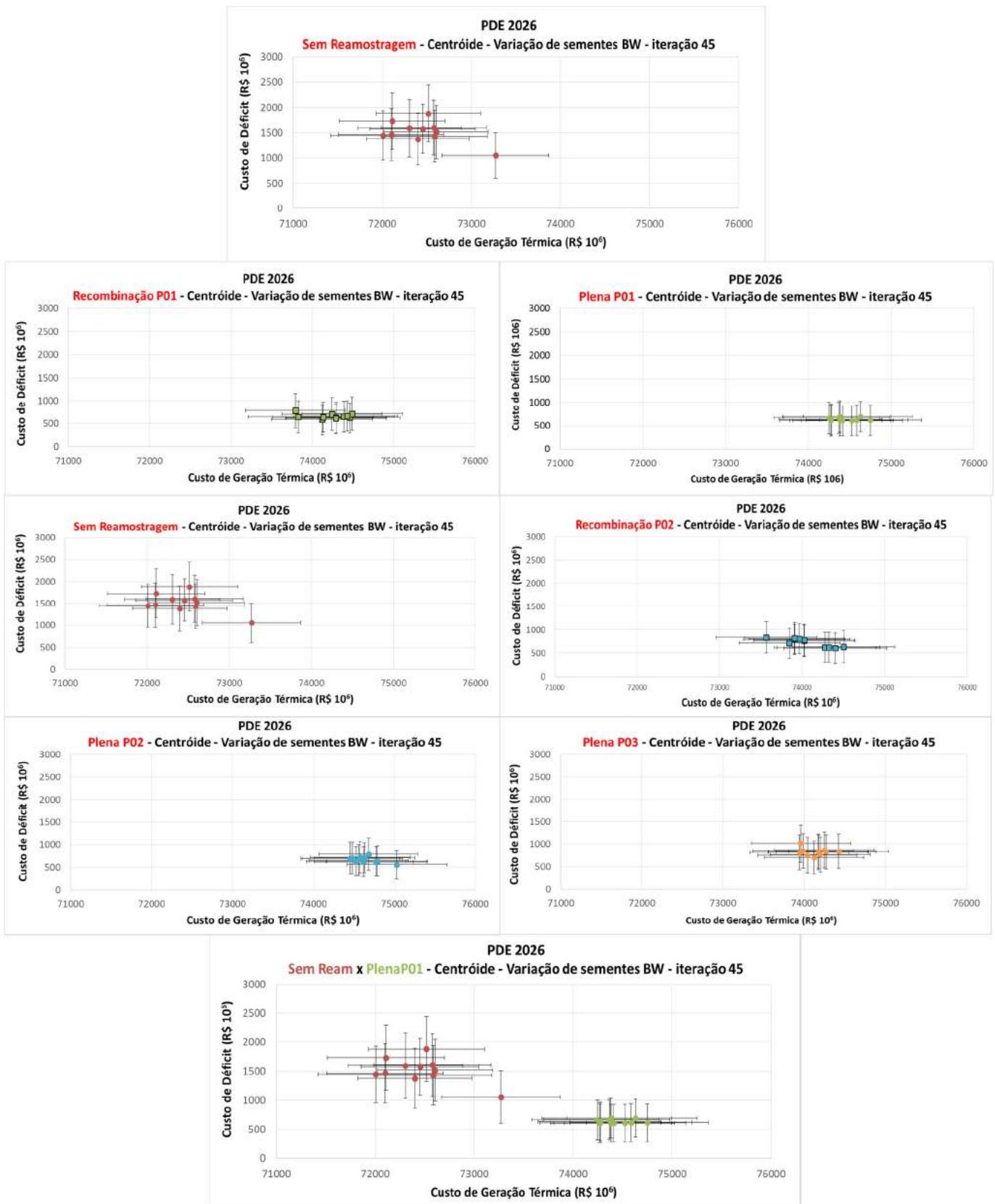


Figura 3.24 – Diagramas de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - Tipos de Reamostragem - Centroíde - PDE 2026.

Portanto, considerando o conjunto de casos simulados e apresentados neste item, a reamostragem plena com passo 01 é aquela que apresenta melhor representação da função de custo futuro, por apresentar maiores valores de ZINF, com menor variabilidade.

3.2.4. Caso Base para o LEN A-4/2018

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o modelo NEWAVE para um caso típico de cálculo de garantias físicas (estático, com 10 anos de período de pré-estudo, 5 anos de período de planejamento e 5 anos de período pós) ao se aplicar os métodos de reamostragem da *forward* descritos anteriormente.

O caso de referência utilizado é o Caso Base para o LEN A-4/2018 [15], no qual são considerados 12 reservatórios equivalentes de energia, CVaR com parametrização (50,40), 200 simulações *forward* e 20 aberturas para as recusões *backward* utilizadas na construção da política de operação. O centroide foi considerado como o representante do processo de agregação de ruídos.

A fim de definir a metodologia de reamostragem da *forward* mais robusta - plena ou por recombinação - e a frequência em que os cenários serão reamostrados (o passo da reamostragem), o caso de referência foi executado na versão 25.6 do modelo NEWAVE, considerando a reamostragem realizada no momento da *forward*, com 45 iterações fixas e variando-se a semente inicial *forward*. Para cada tipo de reamostragem da *forward*, foram considerados os passos 1, 2 e 3 e foi considerada uma amostra de 11 elementos, variando-se a semente *forward* de 0 a 10.

A Figura 3.25, no primeiro gráfico, apresenta os valores de ZINF na 45^a iteração, sem a consideração de reamostragem (SemReam); com reamostragem plena (Plena) e com reamostragem por recombinação (Recomb) aplicadas a cada iteração (P01), a cada duas iterações (P02) e a cada três iterações (P03).

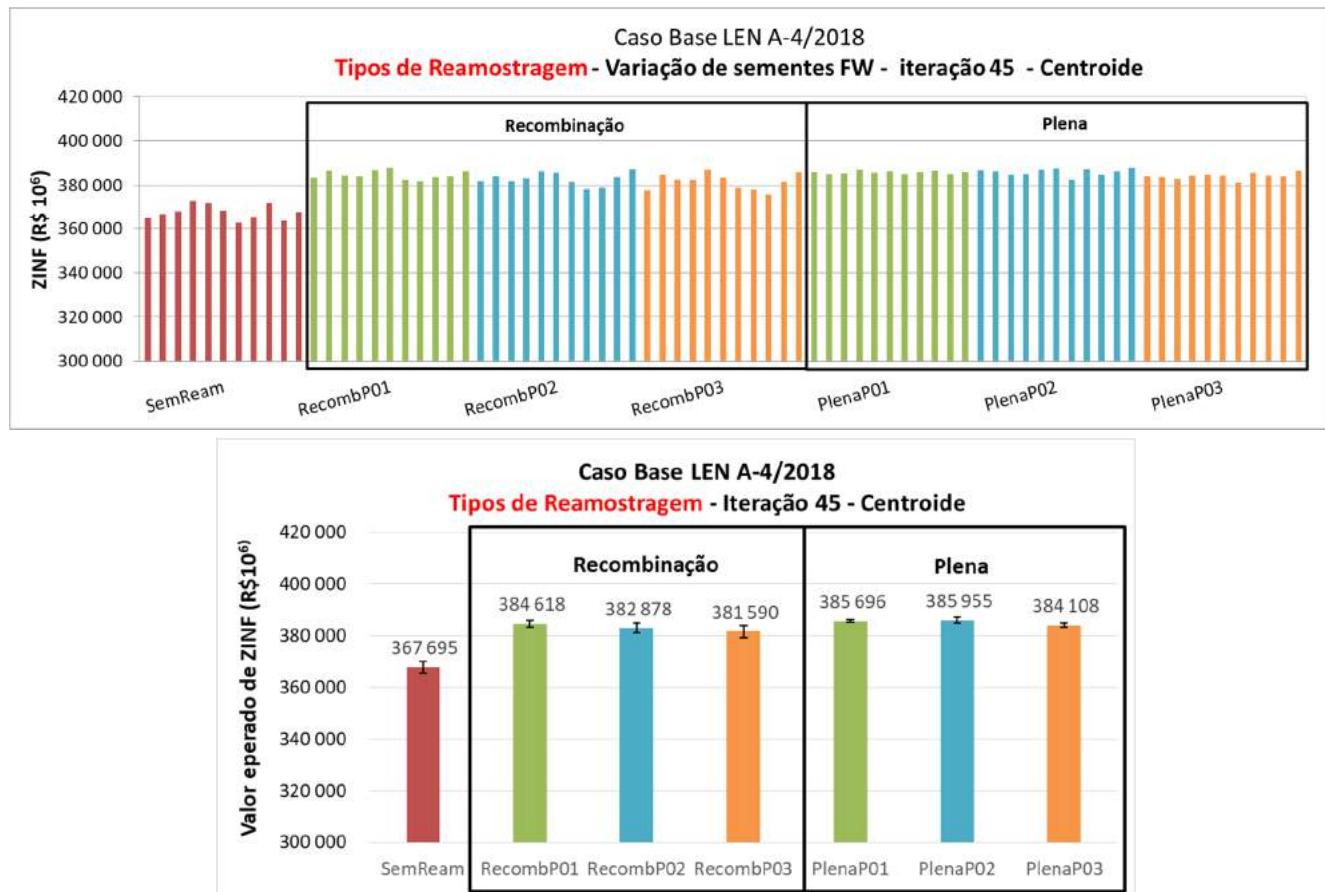


Figura 3.25 – ZINF na 45^a iteração – Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

O segundo gráfico da Figura 3.25 e a Tabela 3.6 apresentam o estimador da média, o estimador do desvio padrão e o intervalo de confiança para o ZINF, conforme apresentado na seção 9.1. Para 11 sementes, o valor crítico, considerando 95% de nível de confiança, é 2,228.

Observa-se:

- v. Ao se considerar reamostragem da *forward*, os valores de ZINF na 45^a iteração são estatisticamente superiores aos valores obtidos nos casos sem reamostragem. Isso evidencia aprimoramento na função de custo futuro, ao se considerar a reamostragem da *forward*.
- vi. Redução na variabilidade dos valores de ZINF na 45^a iteração ao se considerar reamostragem da *forward*.
- vii. A reamostragem plena tende a apresentar menor variabilidade que a reamostragem por recombinação, independente do passo.
- viii. O estimador da média de ZINF na 45^a iteração é estatisticamente equivalente para PlenaP01, PlenaP02 e RecombP01.

Tabela 3.6 – ZINF na 45^a iteração – Intervalo de Confiança (95%) – Tipos de Reamostragem – Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

Tipos de Reamostragem	ZINF na 45 ^a iteração (amostra de 11 sementes <i>forward</i>)		
	Média ($R\$10^6$)	Desvio Padrão ($R\$10^6$)	IC (95%)
Sem Reamostragem	367.695	1.032	[365.395; 369.995]
Recombinação – Passo01	384.618	588	[383.308; 385.929]
Recombinação – Passo02	382.878	868	[380.943; 384.812]
Recombinação – Passo03	381.590	1.098	[379.144; 384.035]
Plena – Passo01	385.696	200	[385.250; 386.141]
Plena – Passo02	385.955	510	[384.819; 387.092]
Plena – Passo03	384.108	390	[383.239; 384.976]

Ao se observar os valores de ZINF ao longo das iterações, nota-se que a variabilidade amostral, ao se variar as sementes *forward*, tende a ser menor ao se considerar reamostragem plena. Adicionalmente, observa-se que os valores da reamostragem plena com passo 01 são maiores que os valores obtidos sem considerar reamostragem a partir da iteração 17, conforme pode ser visto Figura 3.26.

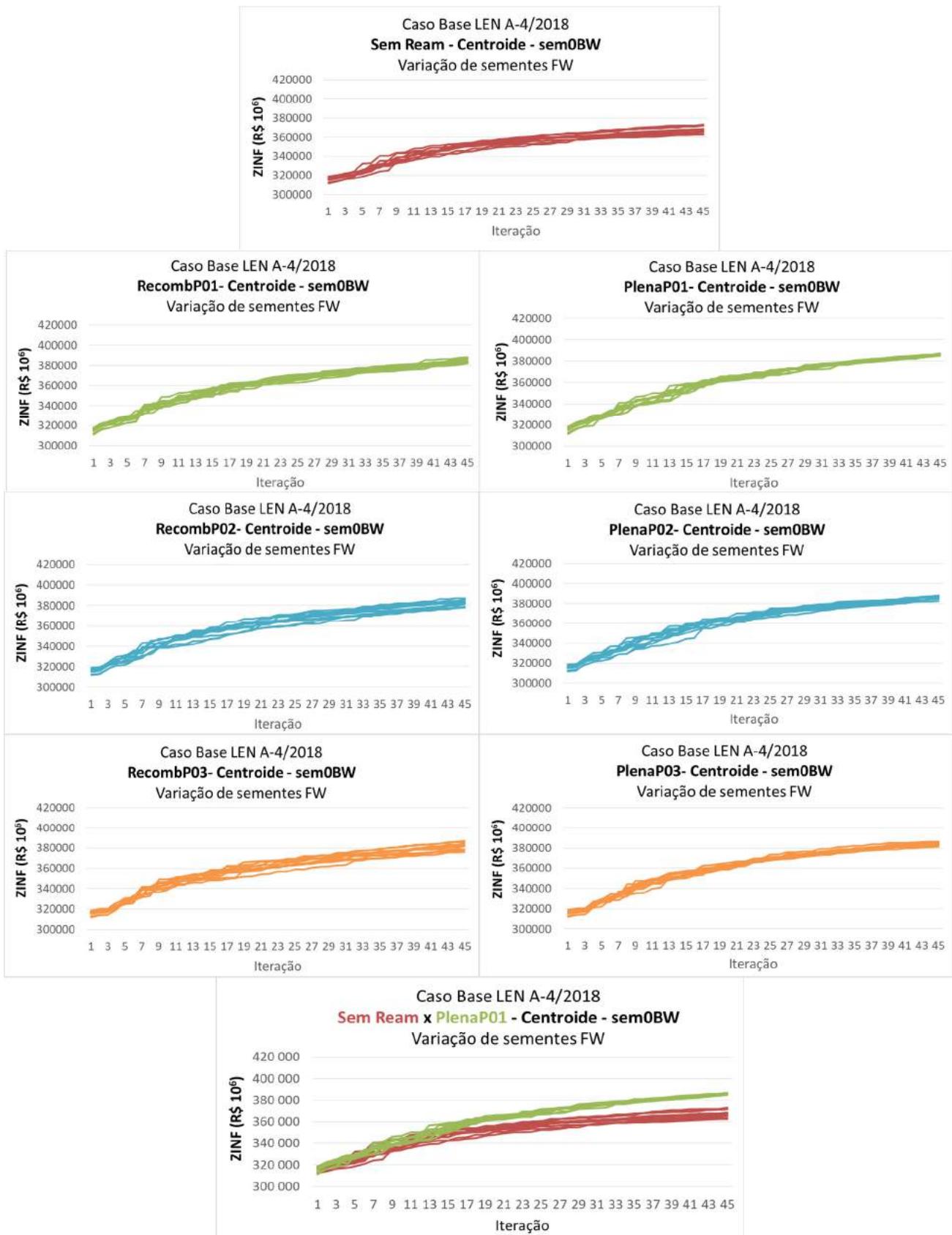


Figura 3.26 – Valores de ZINF ao longo das iterações - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da simulação final com 2.000 cenários de séries sintéticas, para cada uma das 11 sementes *forward*. Considerando reamostragem plena (Plena) e reamostragem por recombinação (Recomb) aplicadas a cada iteração (P01), a cada duas iterações (P02) e a cada três iterações (P03). Também são apresentados os resultados sem a consideração de reamostragem (SemReam).

A Figura 3.27 apresenta o valor esperado do custo total de operação referenciado ao primeiro ano do período de planejamento. Observa-se que o valor médio do custo total de operação apresenta um discreto aumento ao se considerar reamostragem, o que seria um resultado pouco intuitivo (dado que a função objetivo do modelo é minimizar o custo de operação), entretanto, cabe lembrar que em todos esses casos foi considerado CVaR com parametrização (50,40).

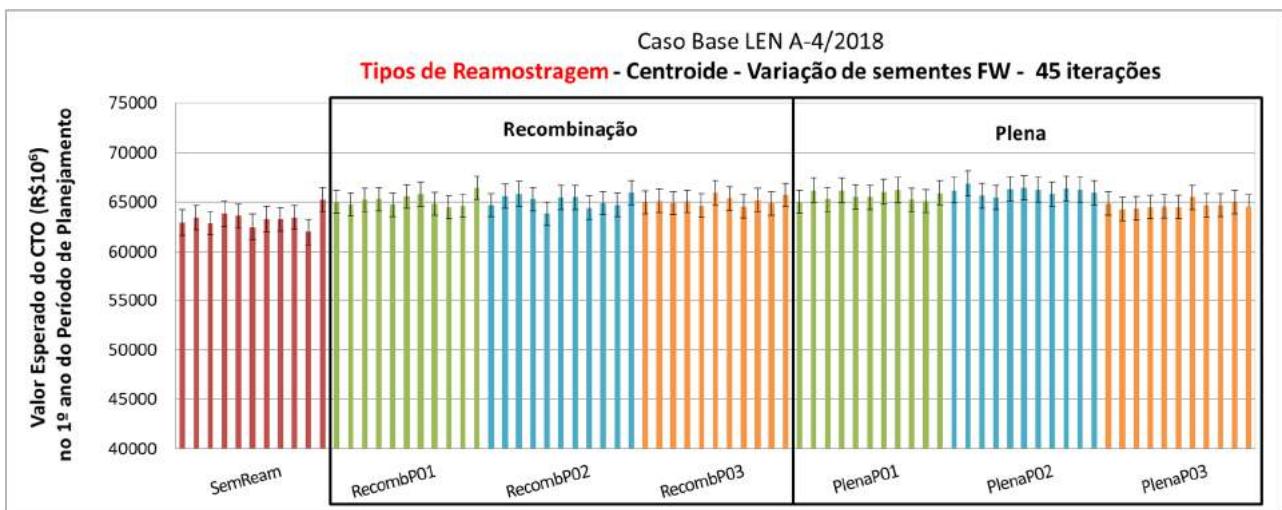


Figura 3.27 – Valor esperado do Custo Total de Operação - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

Na Figura 3.28, são apresentados os diagramas de dispersão para o custo de geração térmica versus o custo de déficit.

Observa-se, ao se considerar reamostragem dos cenários gerados para simulação *forward*:

- vi. Redução da variabilidade do custo de déficit.
- vii. Redução da variabilidade do custo de geração térmica. Em particular, a reamostragem plena apresenta menor variabilidade que a reamostragem por recombinação.
- viii. Redução do custo de déficit.
- ix. Tendência de aumento do custo de geração térmica.

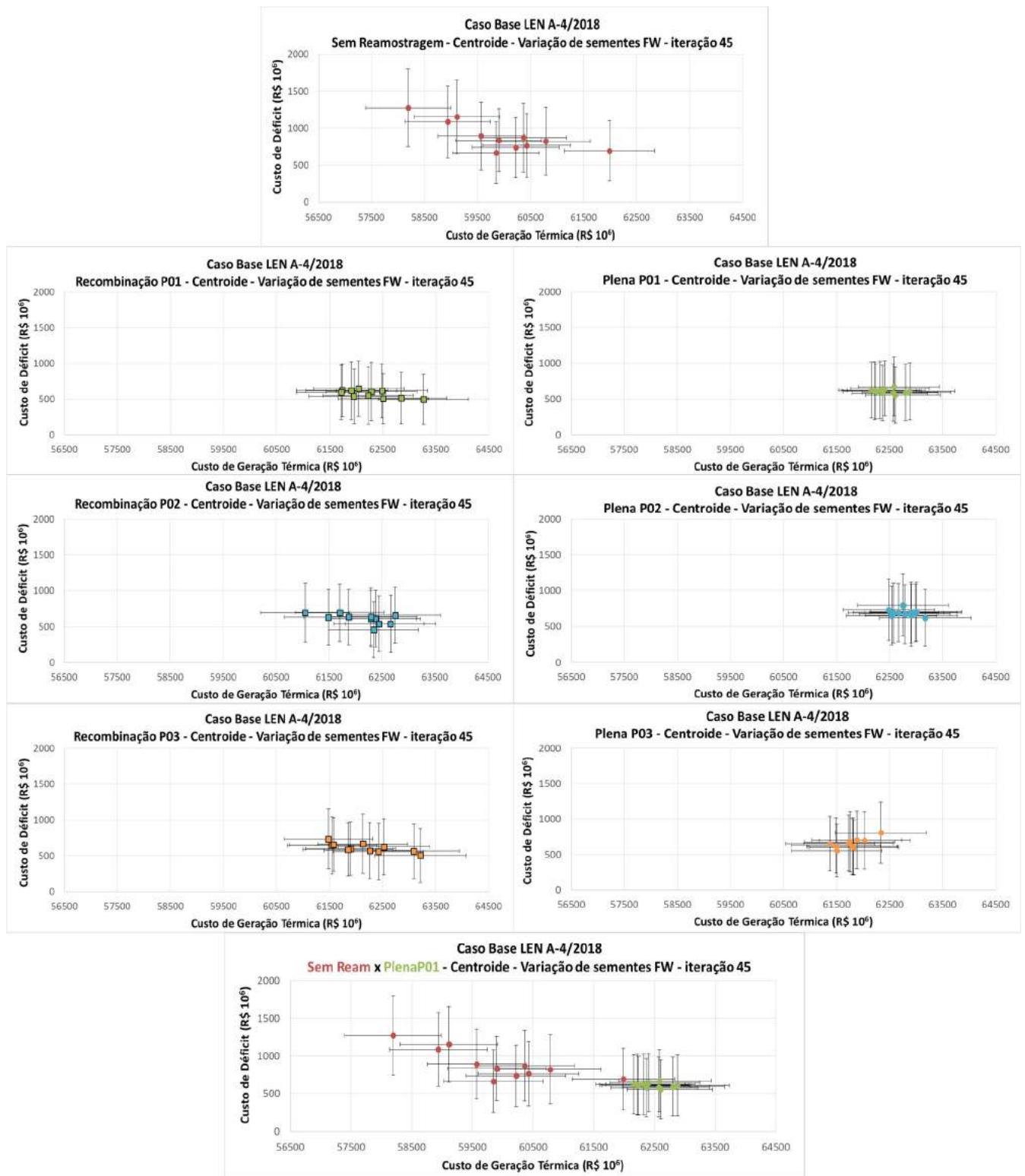


Figura 3.28 – Diagramas de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 3.29 apresenta os valores de custo marginal médio no período de planejamento. Observa-se, ao se considerar reamostragem dos cenários gerados para simulação *forward*:

- Redução da variabilidade ao se considerar várias sementes *forward*. A diferença entre o menor limite inferior e o maior limite superior do intervalo de confiança de 95% de uma distribuição normal para o CMO reduz de 24 R\$/MWh (para o caso SemReam) para 15 R\$/MWh (RecombP01), 17 R\$/MWh (RecombP02), 17 R\$/MWh (RecombP03), 11 R\$/MWh (PlenaP01), 12 R\$/MWh (PlenaP02), 14 R\$/MWh (PlenaP03).
- Tendência de aumento dos valores de CMO.

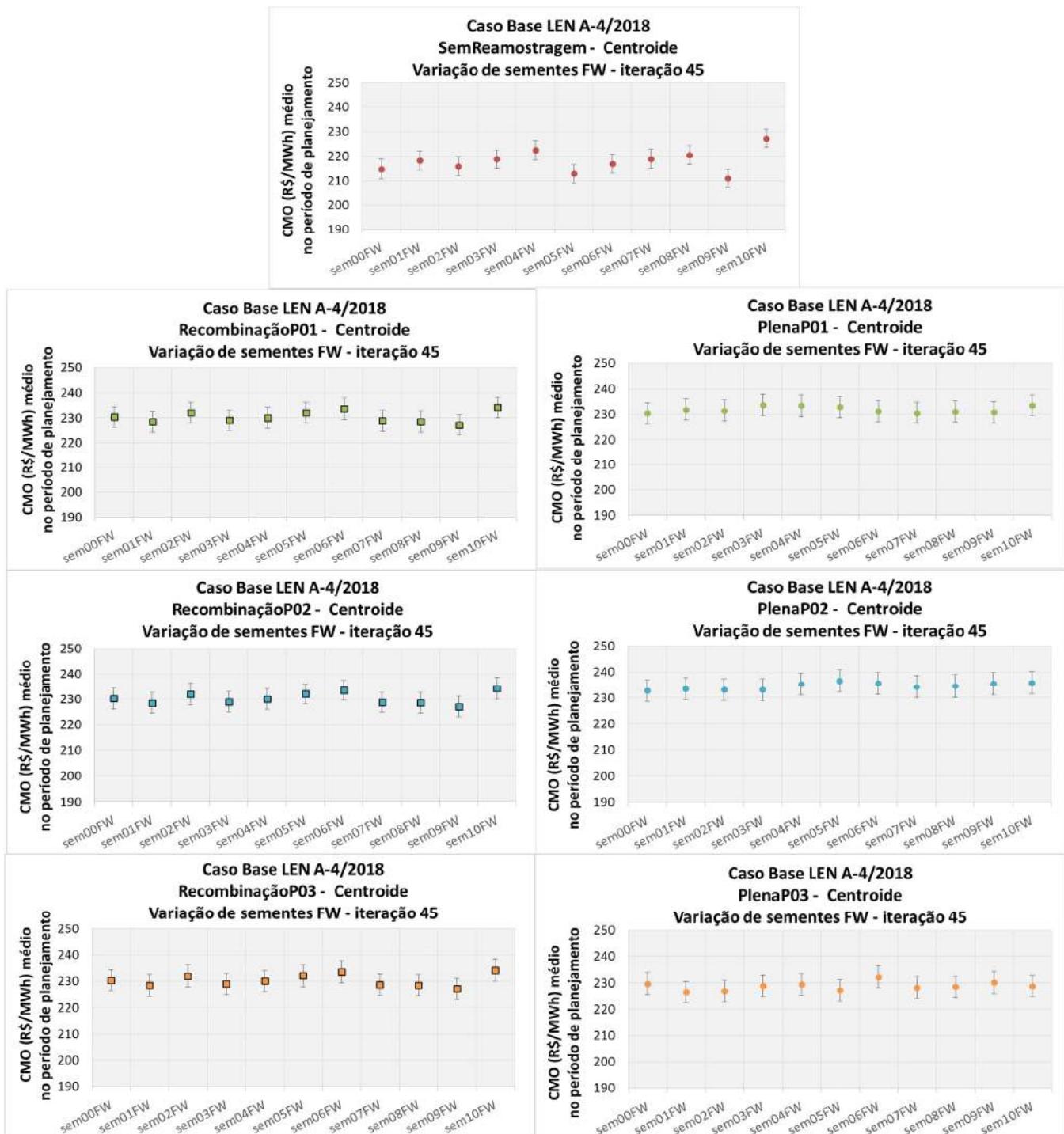


Figura 3.29 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 3.30 apresenta a evolução mensal dos valores dos custos marginais de operação médios no período de planejamento variando a semente forward. Observa-se, ao se considerar reamostragem dos cenários gerados para simulação *forward*, redução na dispersão entre as curvas de CMO.

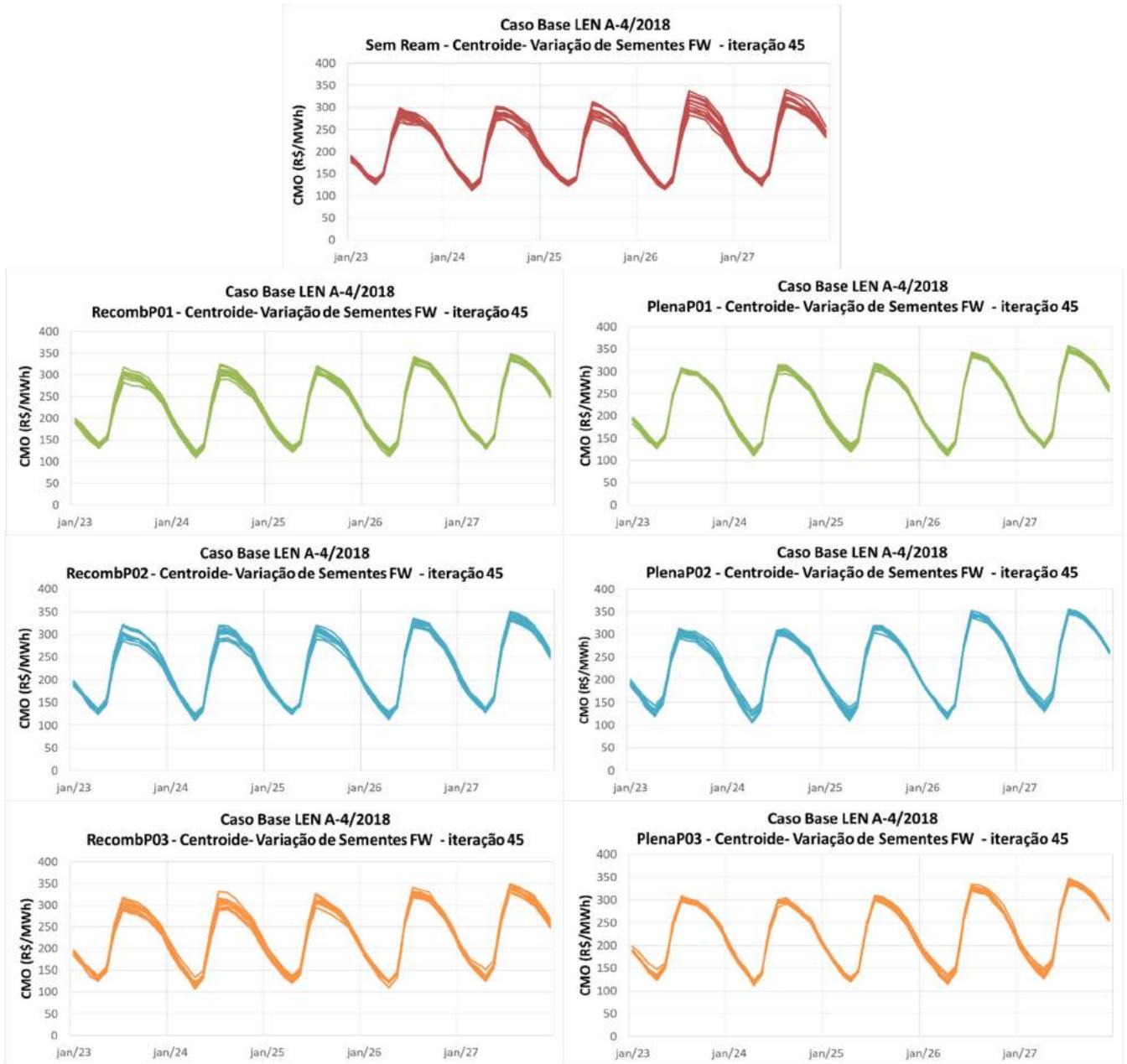


Figura 3.30 – Evolução mensal dos Custos Marginais de Operação no período de planejamento - Tipos de Reamostragem - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 3.31 apresenta os valores médios anuais de custo marginal de operação no período de planejamento. Observa-se que a reamostragem da *forward* não foi suficiente para tornar os valores de CMO entre os anos do período de planejamento estatisticamente equivalentes, apesar de ter reduzido a diferença entre os anos.

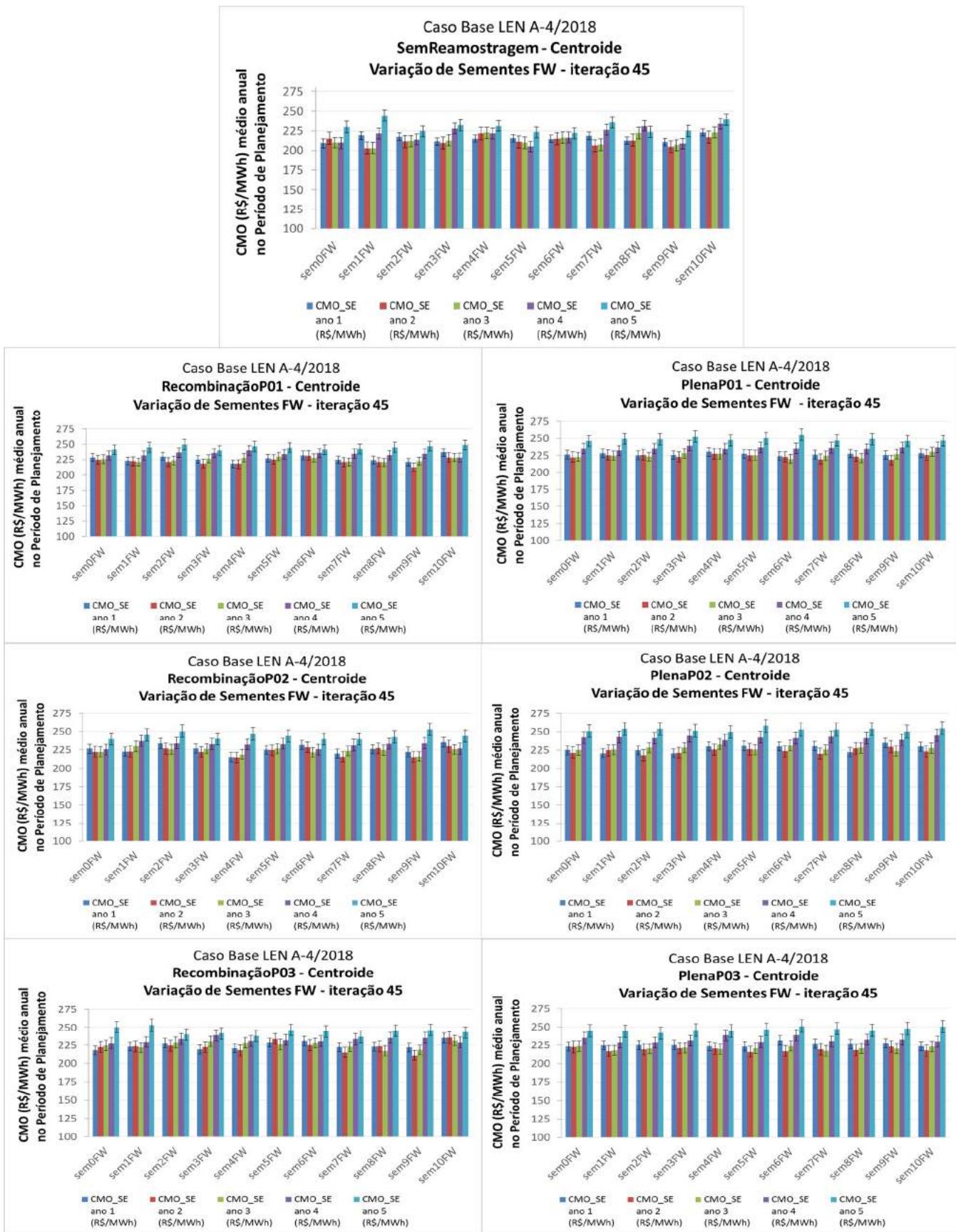


Figura 3.31 – Custo Marginal de Operação anual no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

3.2.5. Conclusão (quanto à definição do tipo de reamostragem e passo)

Os resultados apontaram para as seguintes conclusões: (i) ganhos relevantes na qualidade da função de custo futuro, quando se utilizam técnicas de reamostragem, devido ao aumento do número de cenários da árvore amostrada para a simulação forward, possibilitando uma melhor aproximação do limite inferior do valor esperado do custo de operação (ZINF) em direção ao valor ótimo teórico do problema; (ii) redução da variabilidade amostral, refletido tanto para no ZINF quanto no valor esperado dos custos marginais de operação; (iii) o método de reamostragem plena passo 1 no momento forward é o que produz a menor variabilidade amostral e as melhores estimativas em direção ao valor ótimo teórico do problema, apresentando ainda uma boa solução de compromisso na análise de trade-off entre os custos esperados de geração térmica e déficit; e (iv) o critério de parada do algoritmo de PDDE atualmente adotado no modelo NEWAVE continua adequado quando se utilizam as técnicas de reamostragem de cenários forward descritas neste trabalho.

Como mencionado anteriormente, o principal objetivo da reamostragem é aumentar a diversidade dos cenários que são explorados no passo *forward*, fazendo com que se percorra um espaço mais representativo da árvore teórica completa. Uma vez que todas as séries *forward* representam o mesmo processo estocástico e são equiprováveis, não há, em princípio, vantagem em persistir em determinada série ao longo das iterações da PDDE, com o objetivo de construir uma política que seja mais adequada a essa série. Desta forma, quanto mais séries forem visitadas, maior será a diversidade da árvore a ser explorada, sem prejuízo da convergência teórica do algoritmo. Portanto, espera-se que, em média, os melhores resultados sejam obtidos ao se utilizar o passo 1, que oferece a máxima frequência de reamostragem. Com isso, contribui-se para explorar mais rapidamente a árvore de cenários e assim, aplicando-se a reamostragem, caminhar para a convergência do algoritmo de PDDE, como foi mostrado do ponto de vista teórico em [13] e verificado de forma empírica em [14].

3.3. Avaliação quanto à variabilidade da *backward* ao considerar reamostragem da *forward*

Esta seção apresenta o impacto sobre a variabilidade dos cenários da recursão *backward* ao se considerar o centroide como representante do processo de agregação de ruídos e a reamostragem dos cenários de simulação *forward* do tipo plena com passo 01.

3.3.1. PDE 2026

Esta seção apresenta o impacto sobre a variabilidade dos cenários da recursão *backward* ao se considerar a reamostragem dos cenários de simulação *forward* do tipo plena com passo 01, para um caso típico de Plano Decenal de Energia.

Para essa avaliação, foi considerado, tanto no caso sem reamostragem quanto no caso com reamostragem plena com passo 01, o centroide como representante da agregação dos ruídos.

O caso de referência utilizado é o Caso do PDE 2026 [16], no qual são considerados 11 reservatórios equivalentes de energia, CVaR com parametrização (50,40), 200 simulações *forward* e 20 aberturas para as recursos *backward* utilizadas na construção da política de operação.

Para essa avaliação, o caso de referência foi executado na versão 25.6 do modelo NEWAVE com 45 iterações fixas e variando-se a semente inicial *backward*. Para cada representante do processo de geração de cenários, foi considerada uma amostra de 11 elementos, variando-se a semente *backward* de 0 a 10.

A Figura 3.32, no primeiro gráfico, apresenta os valores de ZINF na 45^a iteração.

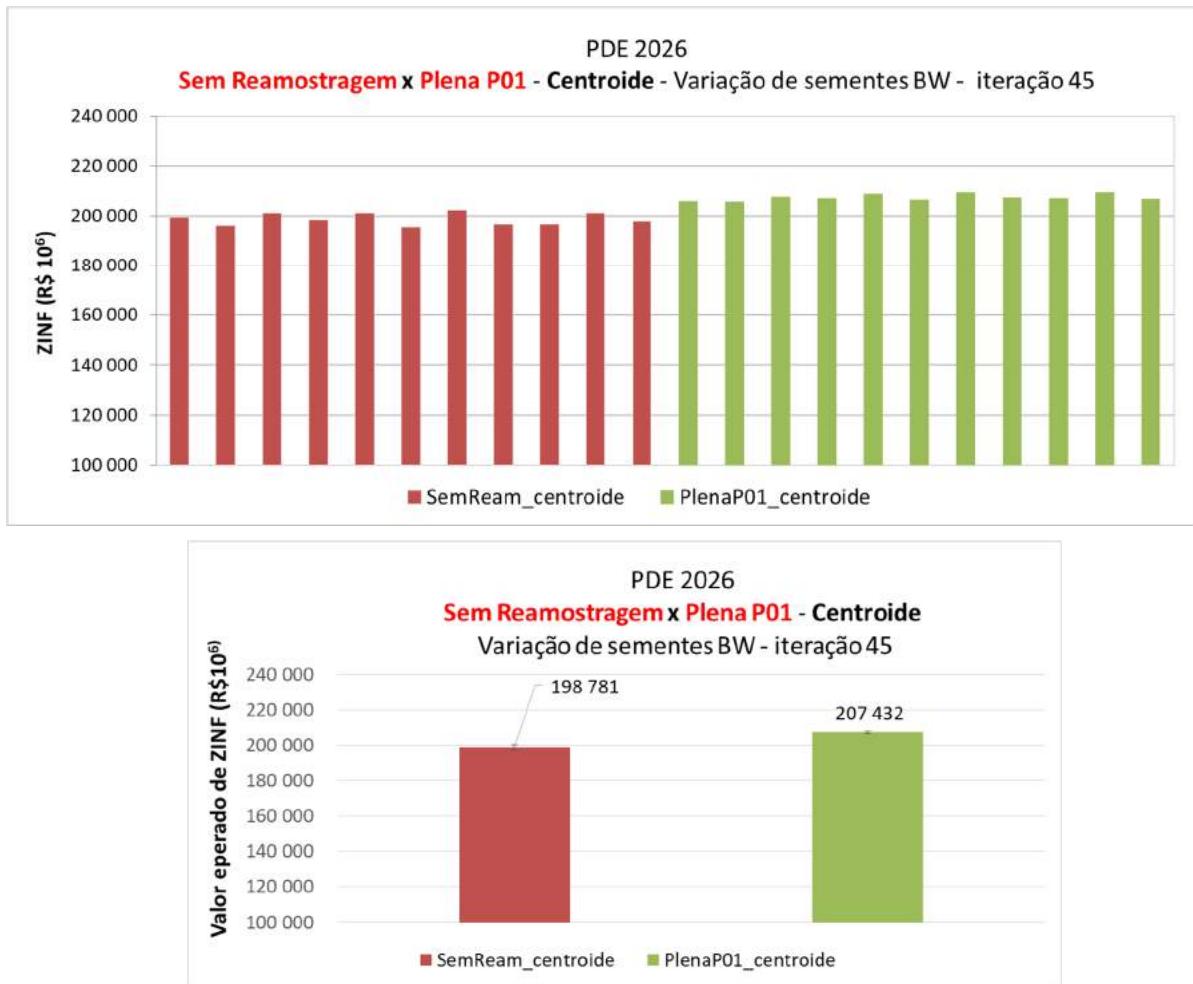


Figura 3.32 – ZINF na 45^a iteração - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.

O segundo gráfico da Figura 3.32 apresentam, para cada representante do processo de agregação de ruídos, o estimador da média, o estimador do desvio padrão e o intervalo de confiança para o ZINF, conforme apresentado na seção 2.2. Para 11 sementes, o valor crítico, considerando 95% de nível de confiança, é 2,228.

Observa-se, ao se considerar o centroide como representante do processo de agregação de ruídos:

- v. Redução significativa no desvio padrão dos valores de ZINF na 45^a iteração.
- vi. Não haver tendência de crescimento ou redução nos valores de ZINF com a variação das sementes. Por exemplo, para a semente 0, há redução, enquanto para a semente 1 há aumento no valor de ZINF.

Tabela 3.7 – ZINF na 45^a iteração - Intervalo de Confiança (95%) - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.

Mais próximo x Centroide	ZINF na 45^a iteração (amostra de 11 sementes <i>backward</i>)		
	Média (R\$10⁶)	Desvio Padrão (R\$10⁶)	IC (95%)
SemReam_centroide	198.781	713	[197.191; 200.370]
PlenaP01_centroide	207.432	356	[206.639; 208.225]

Observa-se redução da variabilidade dos valores de ZINF também ao longo das iterações quando se considera o centroide como o representante do processo de agregação de ruídos, ao se variar sementes *backward*, conforme pode ser visto Figura 3.33.

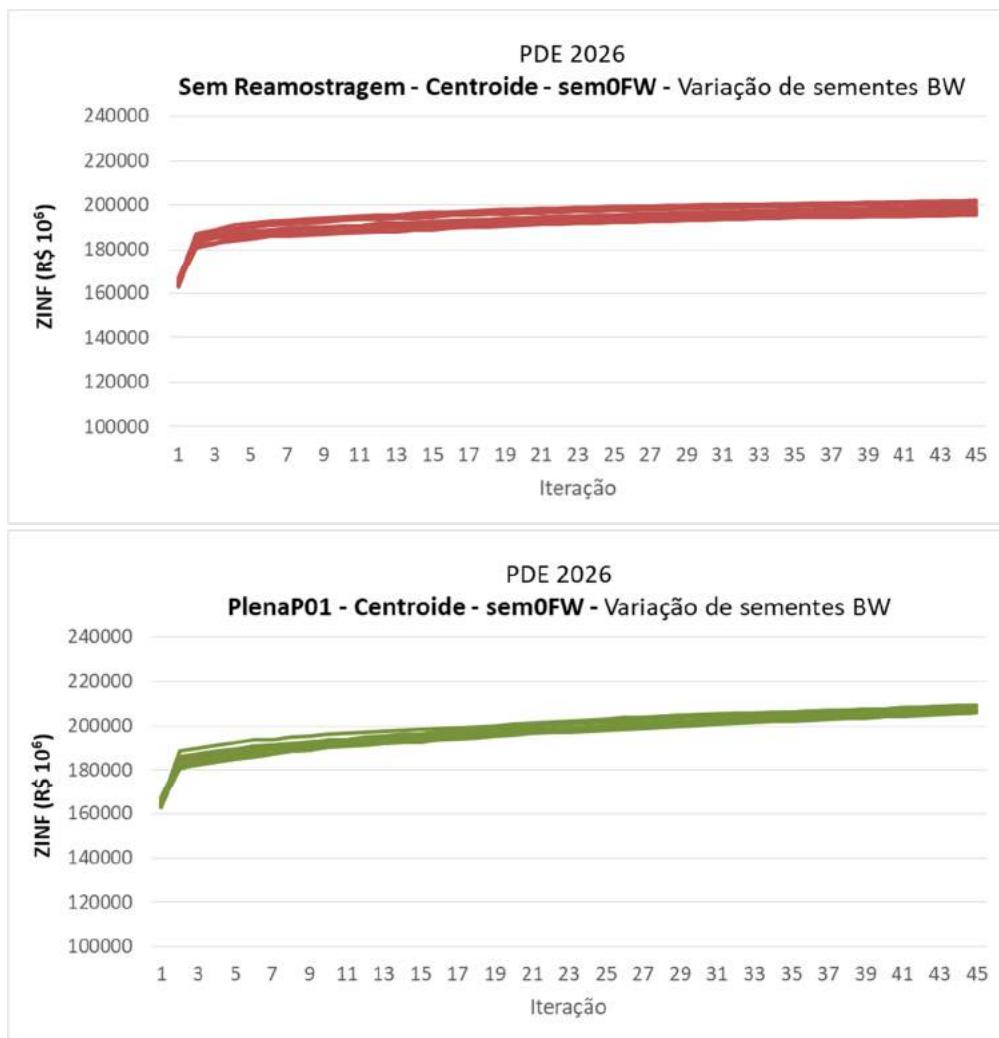


Figura 3.33 – Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da simulação final com 2.000 cenários de séries sintéticas, para cada uma das 11 sementes *backward*. Considerando o centroide como representante do processo de agregação de ruídos.

A Figura 3.34 apresenta o valor esperado do custo total de operação referenciado ao primeiro ano do período de planejamento. Observa-se, ao se considerar a reamostragem plena, passo 01:

- v. Redução da variabilidade do custo total de operação, ao se variar sementes *backward*.
- vi. Não haver tendência de crescimento ou redução nos valores de custo total de operação.

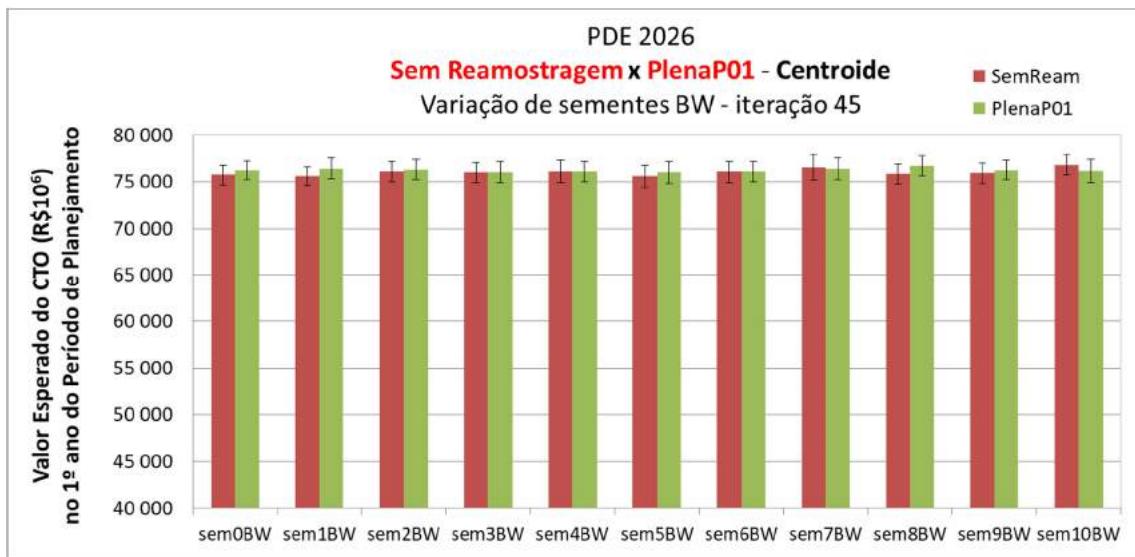


Figura 3.34 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.

A Figura 3.35 apresenta o diagrama de dispersão para o custo de geração térmica versus o custo de déficit. Observa-se, ao se considerar a reamostragem plena, passo 01:

- Redução da variabilidade do custo de déficit.
- Aumento da variabilidade do custo de geração térmica.

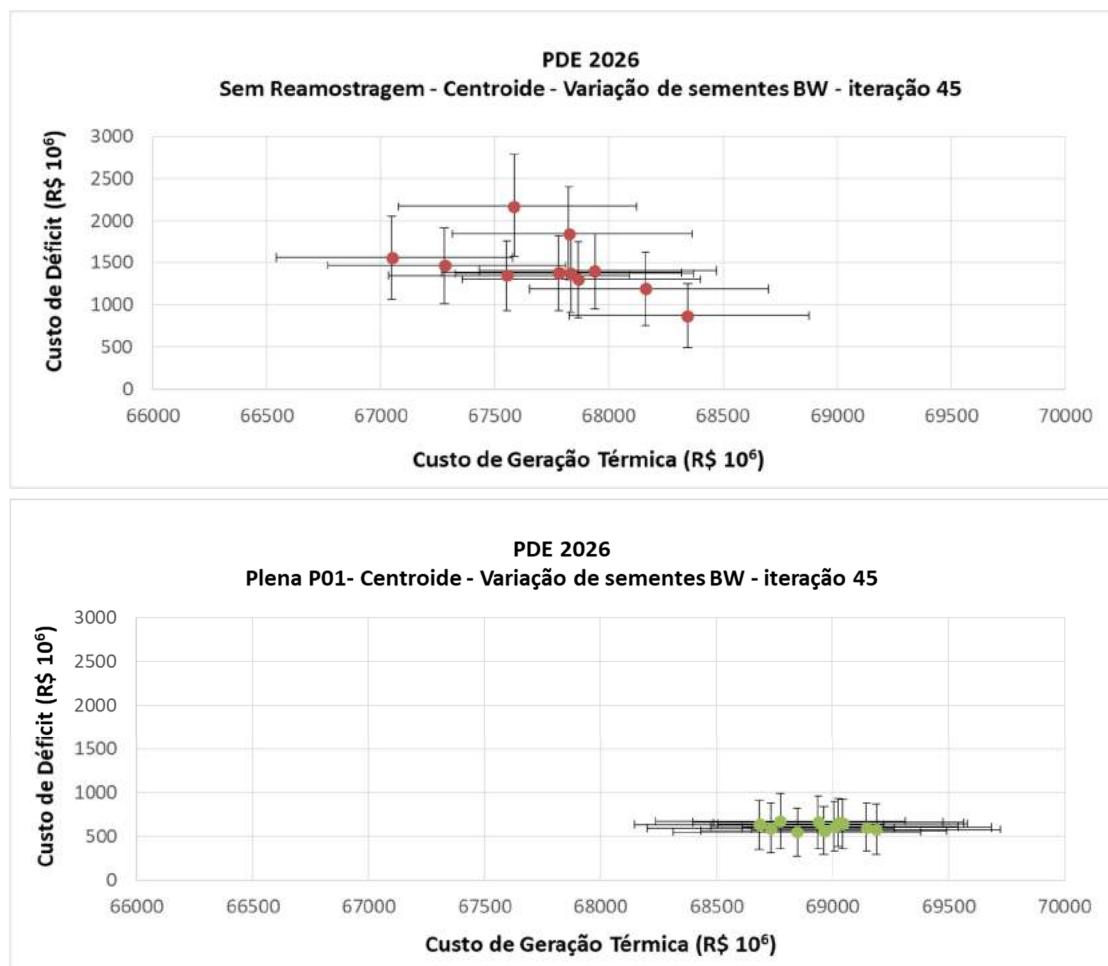


Figura 3.35 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam x PlenaP01 - Centroide - PDE 2026.

3.3.2. Caso Base para o LEN A-4/2018

Esta seção apresenta o impacto sobre a variabilidade dos cenários da recursão *backward* ao se considerar a reamostragem dos cenários de simulação *forward* do tipo plena com passo 01, para um caso típico de cálculo de garantias físicas (estático, com 10 anos de período de pré-estudo, 5 anos de período de planejamento e 5 anos de período pós).

Para essa avaliação, consideraremos, o centroide como representante da agregação dos ruídos, tanto no caso sem reamostragem, quanto no caso com reamostragem plena com passo 01.

O caso de referência utilizado é o Caso Base para o LEN A-4/2018 [15], no qual são considerados 12 reservatórios equivalentes de energia, CVaR com parametrização (50,40), 200 simulações *forward* e 20 aberturas para as recursões *backward* utilizadas na construção da política de operação.

Para essa avaliação, o caso de referência foi executado na versão 25.6 do modelo NEWAVE com 45 iterações fixas e variando-se a semente inicial *backward*. Para cada representante do processo de geração de cenários, foi considerada uma amostra de 11 elementos, variando-se a semente *backward* de 0 a 10.

A Figura 3.36, no primeiro gráfico, apresenta os valores de ZINF na 45^a iteração.

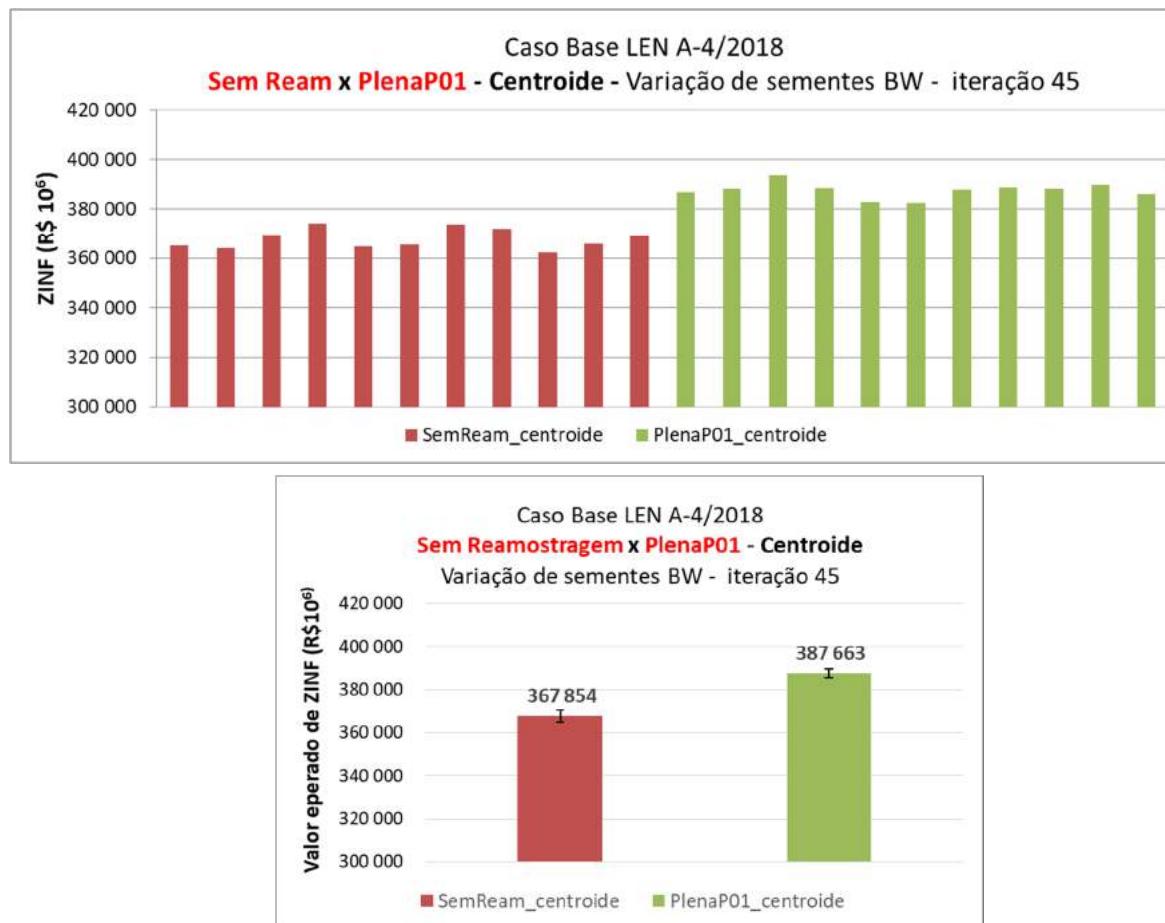


Figura 3.36 –ZINF na 45^a iteração - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

O segundo gráfico da Figura 3.36 e a Tabela 3.8 apresentam, para o caso sem reamostragem da *forward* e para o caso com reamostragem plena com passo 01, o estimador da média, o estimador do desvio padrão e o intervalo de confiança para o ZINF, conforme apresentado na seção 9.1. Para 11 sementes, o valor crítico, considerando 95% de nível de confiança, é 2,228.

Observa-se, ao se considerar reamostragem da *forward* plena com passo 01:

- i. Redução no desvio padrão dos valores de ZINF na 45^a iteração.
- ii. Aumento valores de ZINF na 45^a iteração.

Tabela 3.8 – ZINF na 45^a iteração – Intervalo de Confiança (95%) - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

SemReam x PlenaP01 Centroide	ZINF na 45^a iteração (amostra de 11 sementes backward)		
	Média ($R\$10^6$)	Desvio Padrão ($R\$10^6$)	IC (95%)
SemReam_centroide	367 854	1 225	[365 123, 370 584]
PlenaP01_centroide	387 663	927	[385 596, 389 729]

Quando se observam os valores de ZINF ao longo das iterações, ao se variar sementes *backward*, não se identifica claramente uma redução na variabilidade amostral. Entretanto, nota-se que os valores de ZINF considerando reamostragem plena com passo 01 são maiores que os valores sem considerar reamostragem a partir da iteração 30, conforme pode ser visto na Figura 3.37.

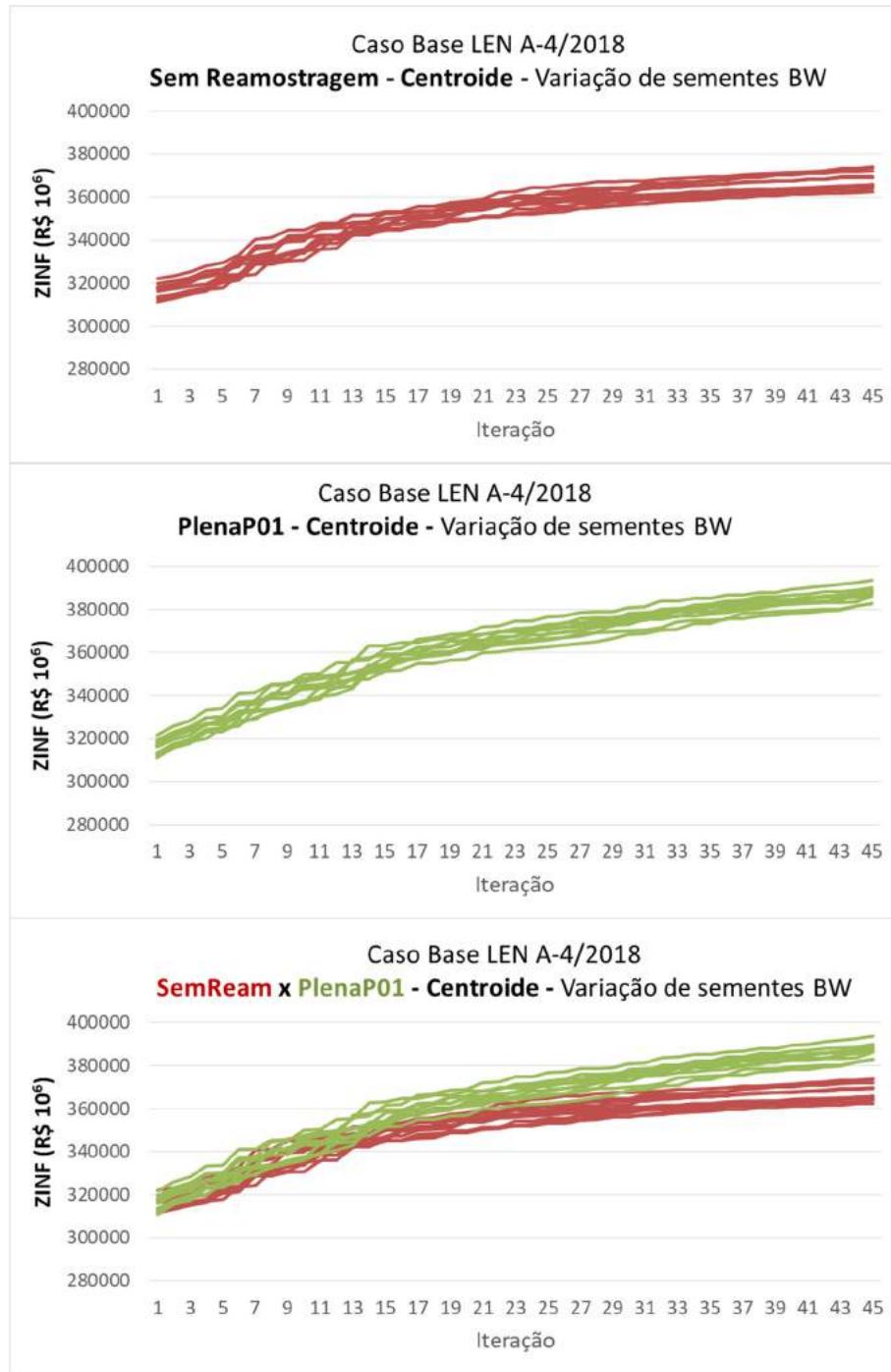


Figura 3.37 - Valores de ZINF ao longo das iterações - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da simulação final com 2.000 cenários de séries sintéticas, para cada uma das 11 sementes *backward*. Considerando o centroide como o representante do processo de agregação de ruídos, avaliar-se-á o impacto sobre a variabilidade amostral ao se considerar a reamostragem da *forward* plena com passo 01.

A Figura 3.38 apresenta o valor esperado do custo total de operação referenciado ao primeiro ano do período de planejamento. Observa-se que, para a maioria das sementes, o valor de custo total de operação para o caso sem reamostragem é equivalente estatisticamente ao valor do caso com reamostragem plena com passo 01.

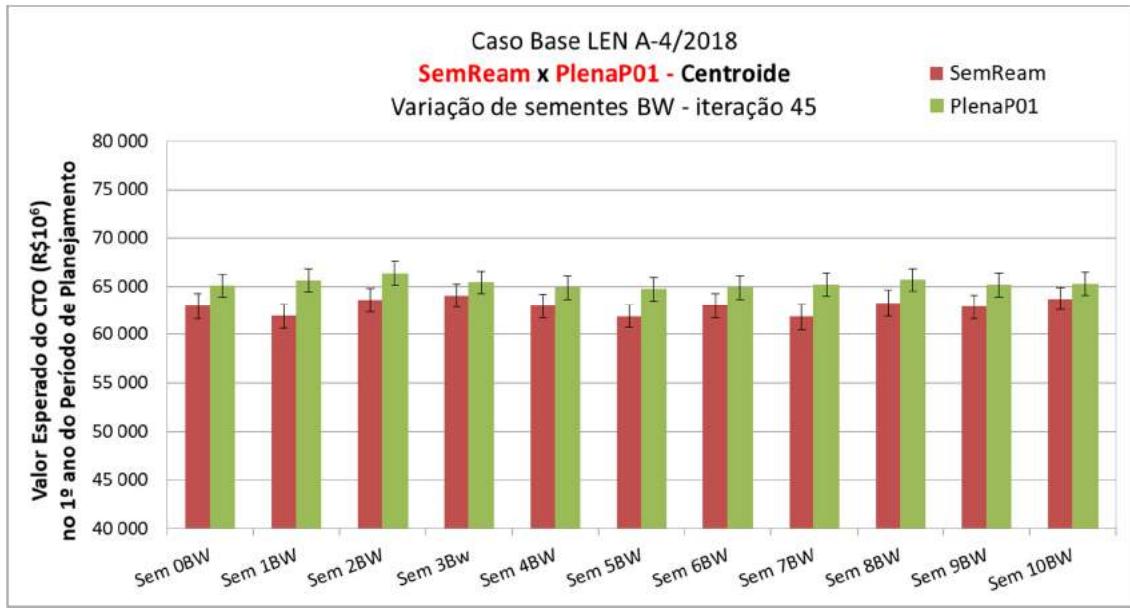


Figura 3.38 – Valor esperado do Custo Total de Operação - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A - 4/2018.

A Figura 3.39 apresenta o diagrama de dispersão para o custo de geração térmica versus o custo de déficit. Observa-se, ao se considerar a reamostragem da *forward* plena com passo 01:

- iii. Redução da variabilidade do custo de déficit e do custo de térmica.
- iv. Tendência de aumento no custo de geração térmica.

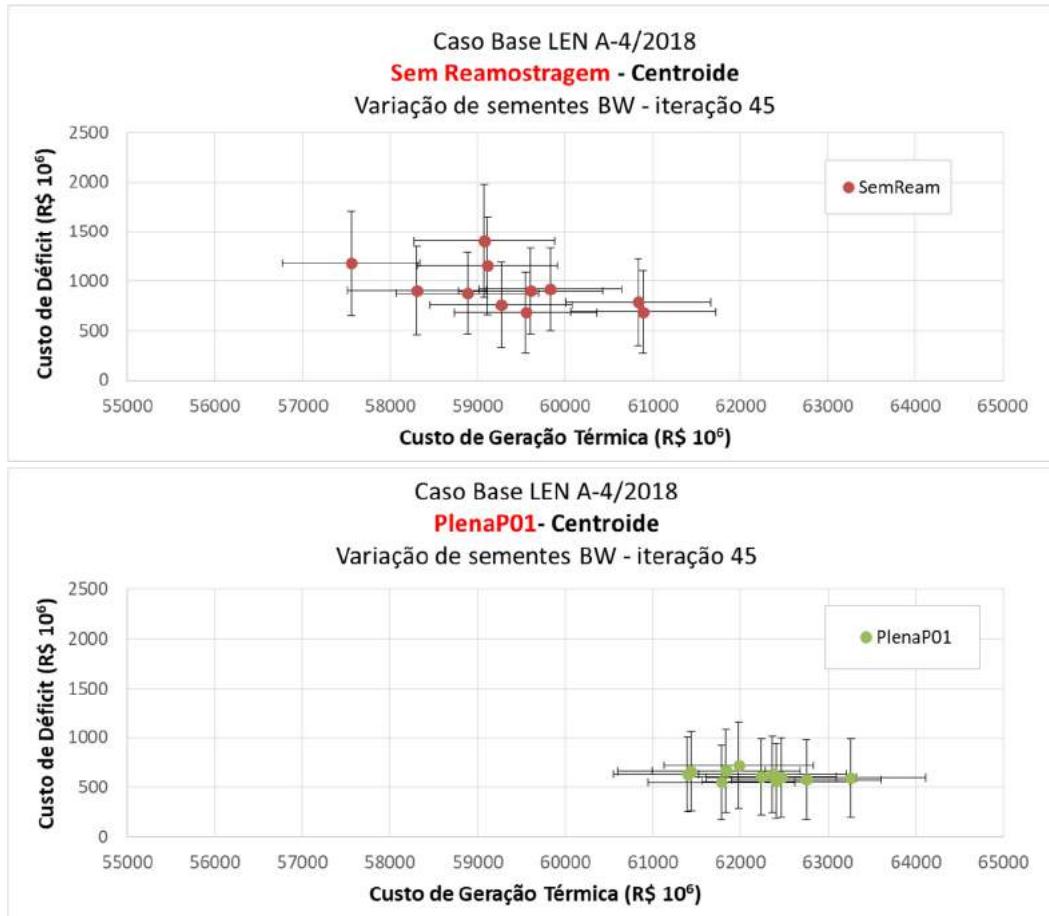


Figura 3.39 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 3.40 apresenta os valores de custo marginal médio no período de planejamento. Observa-se, ao se considerar a reamostragem da *forward* plena com passo 01:

- i. Tendência de aumento dos valores de CMO.
- ii. Redução da variabilidade dos valores de CMO, pois a diferença entre o limite superior e o limite inferior, para o intervalo de confiança de 95% de uma distribuição normal, reduz de 31 R\$/MWh ($31=232-201$) para 22 R\$/MWh ($22=226 - 204$).

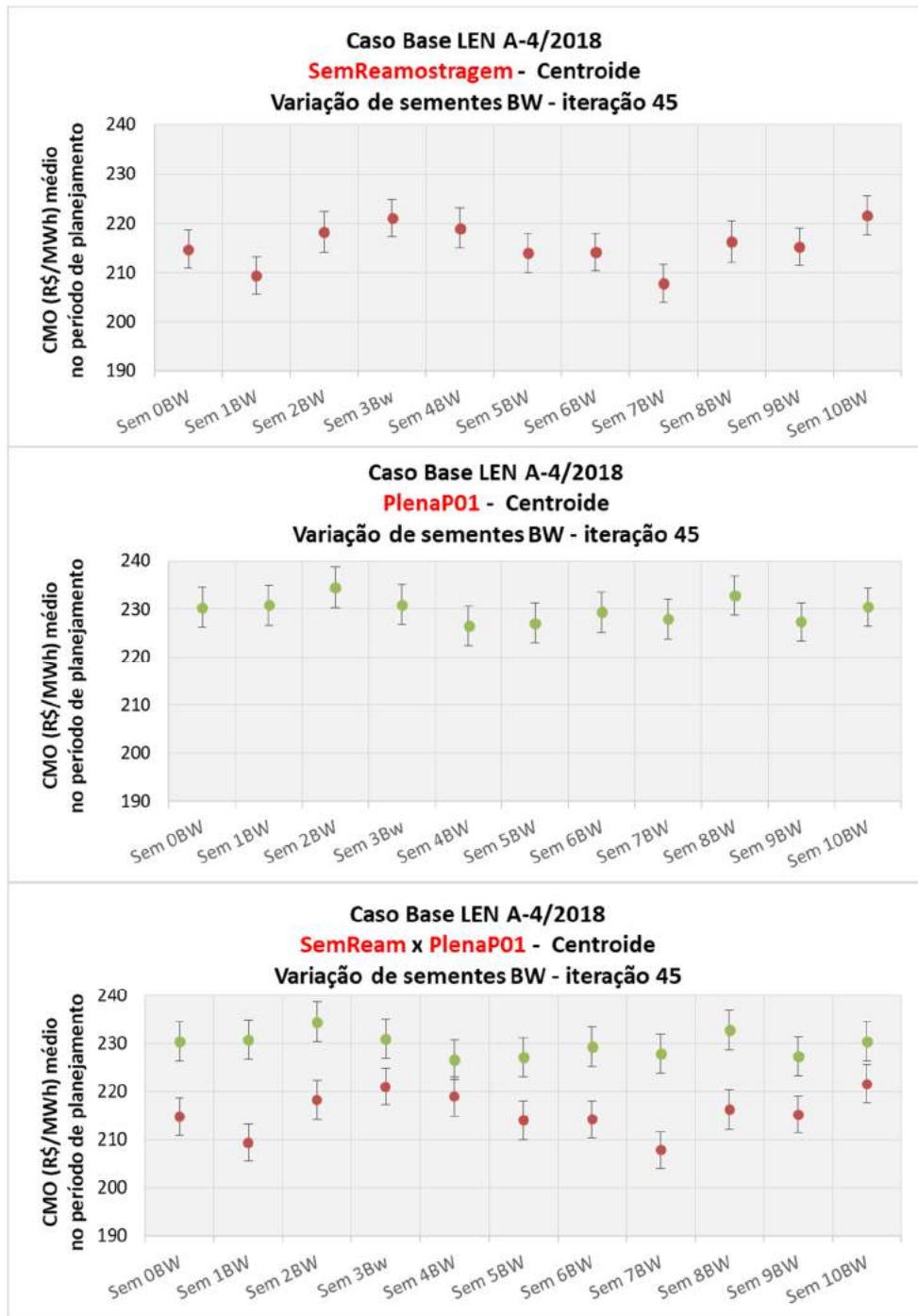


Figura 3.40 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - SemReam x PlenaP01 - Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 3.41 apresenta a evolução mensal dos valores dos custos marginais de operação médios no período de planejamento. Observa-se redução da variabilidade ao se considerar reamostragem plena da *forward* com passo 01.

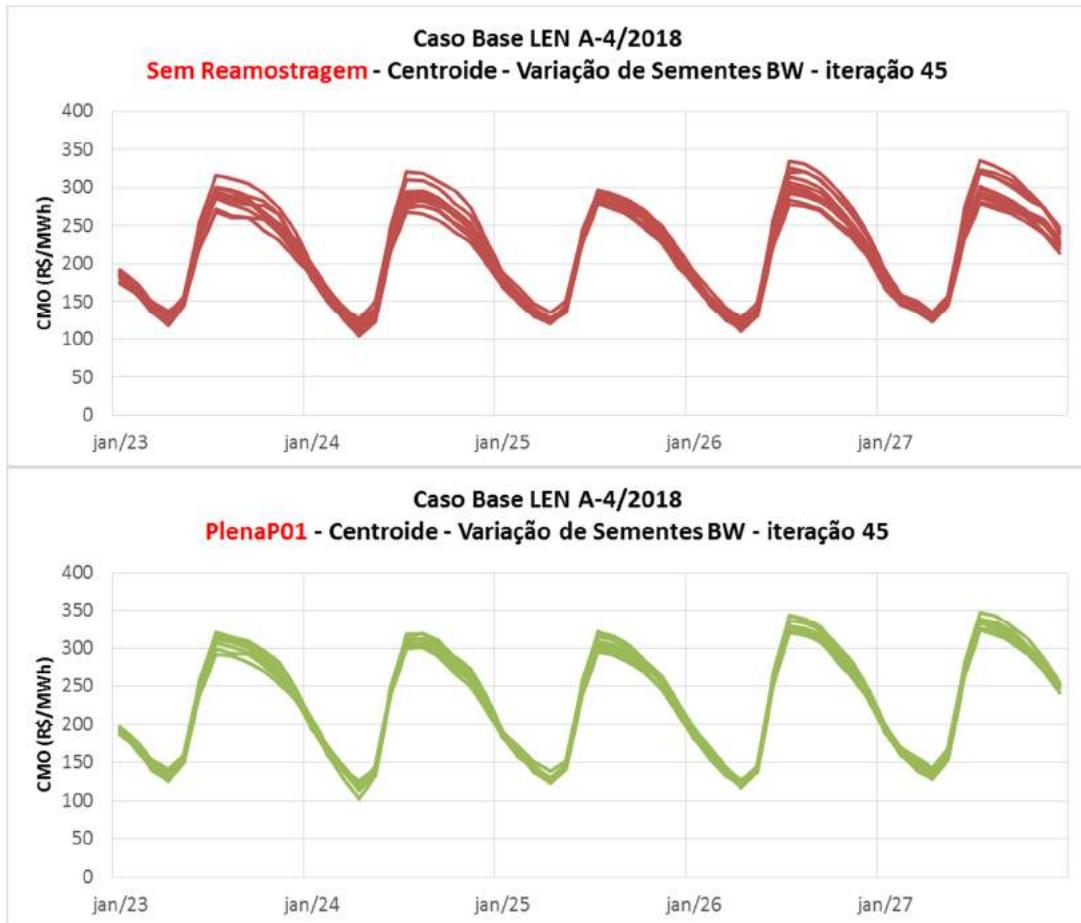


Figura 3.41 – Evolução Mensal dos Custos Marginais de Operação no período de planejamento - SemReam – Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

A Figura 3.42 apresenta os valores médios anuais de custo marginal de operação no período de planejamento.

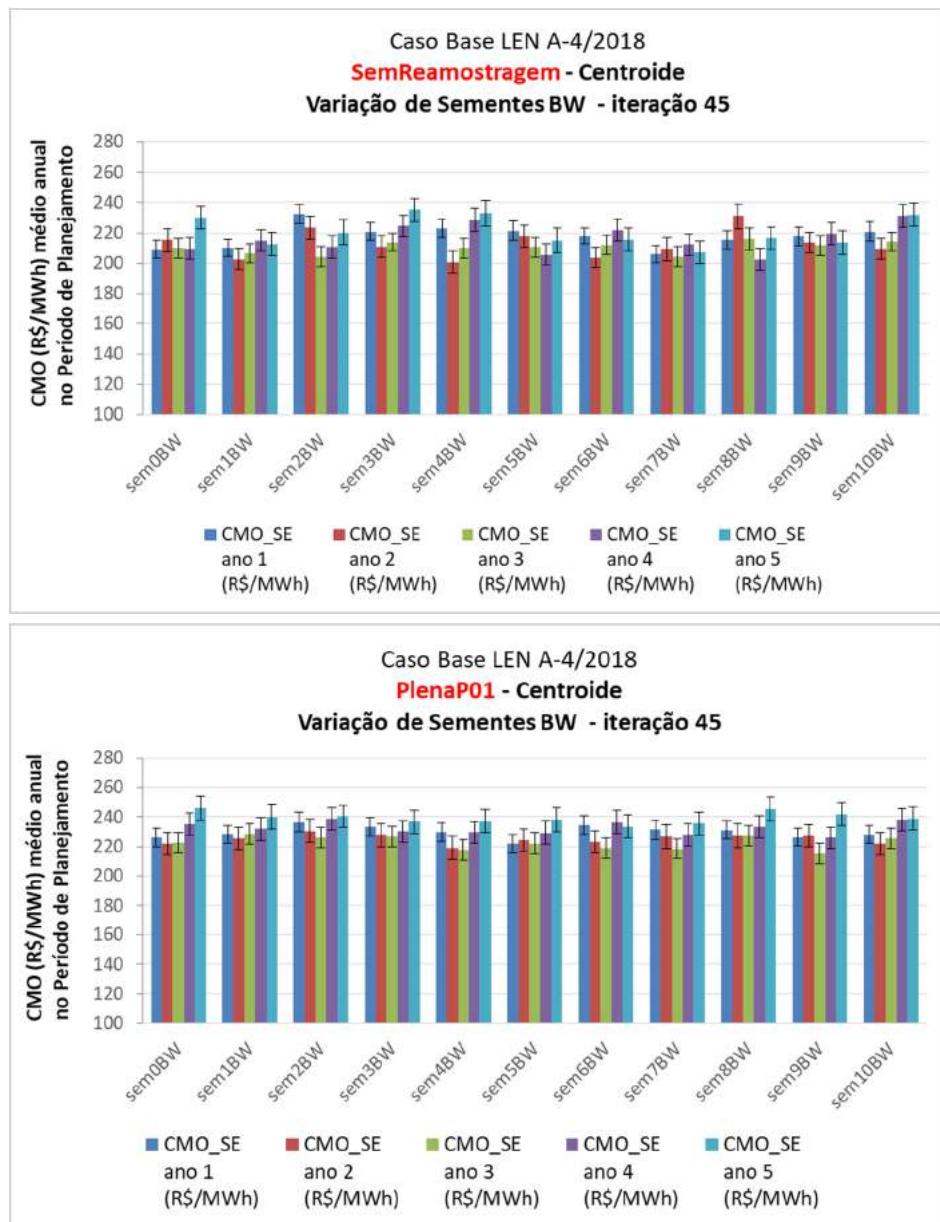


Figura 3.42 – Custo Marginal de Operação anual no período de planejamento - SemReam - Mais próximo x Centroide - Caso Base LEN A-4/2018.

3.3.3. Conclusão (quanto à variabilidade da *backward* ao se considerar reamostragem da *forward*)

Ao considerar o centroide como representante no processo de agregação dos ruídos observa-se redução na variabilidade dos cenários gerados para a recursão *backward*. Essa redução é ainda mais acentuada ao se considerar reamostragem da *forward*. Portanto, o GT Metodologia indica seu uso para o ano de 2020, cuja aprovação depende da decisão plenária da CPAMP. Os testes de validação dessa implementação estão sendo realizados pela FT-NEWAVE.

4. Avaliação do número de *backwards* e *forwards*

4.1. Análise de energias

Ao considerar o uso do centroide como representante do *cluster* no processo de agregação dos ruídos é importante avaliar se os cenários de energia utilizados na *backward* e na *forward* estão aderentes à série de energia natural afluente histórica ou se haveria ganho significativo em aumentar tais parâmetros, atualmente 20 aberturas *backwards* e 200 *forwards*.

Nesse contexto, foram geradas as permanências de energia da série histórica e das séries sintéticas da política variando ora o número de aberturas da *backward*, ora o número de simulações *forward* em casos sem tendência hidrológica. Para verificar se as energias históricas e sintéticas são provenientes de uma mesma população com uma determinada distribuição, utilizou-se o teste de *Kolmogorov-Smirnov*. A hipótese nula deste teste de hipóteses considera que as duas distribuições são provenientes da mesma distribuição com nível de significância 5% e a estatística de teste é a maior distância entre as distribuições $D_{\text{máx}}$, conforme exemplifica a Figura 4.1 abaixo.

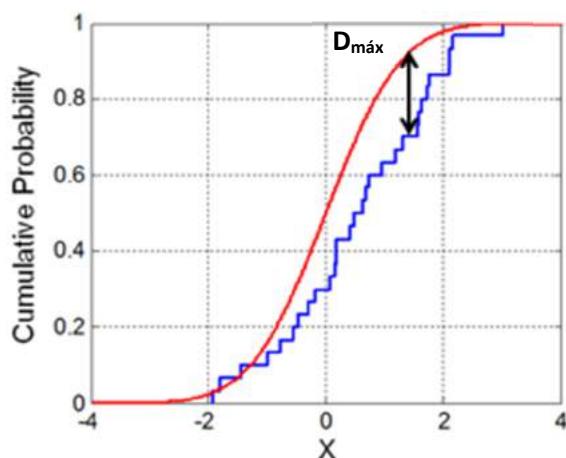


Figura 4.1 – Distribuições acumuladas e estatística de teste.

Para um nível de significância de 5% e mais de 50 dados (N), o valor crítico de D é dado pela equação abaixo.

$$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$$

4.1.1. Forward

Foi utilizado o deck do leilão A-4 de 2018, no qual alterou-se o representante da agregação do elemento mais próximo para centroide e usou-se a reamostragem da *forward*. Foram rodados casos com 200, 250 ou 300 simulações *forward* e, além disso, executou-se o mesmo caso 11 vezes alterando a semente inicial, como esquematizado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo. A permanência considerou a energia de todas as reamostragens para um determinado reservatório equivalente de energia e um período.

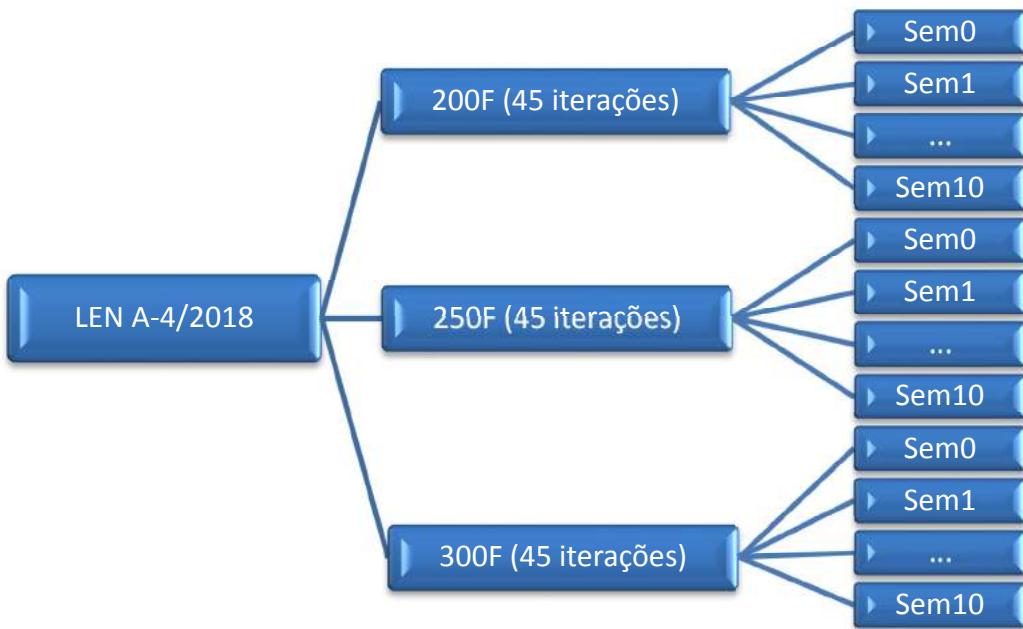


Figura 4.2 – Relação dos casos rodados.

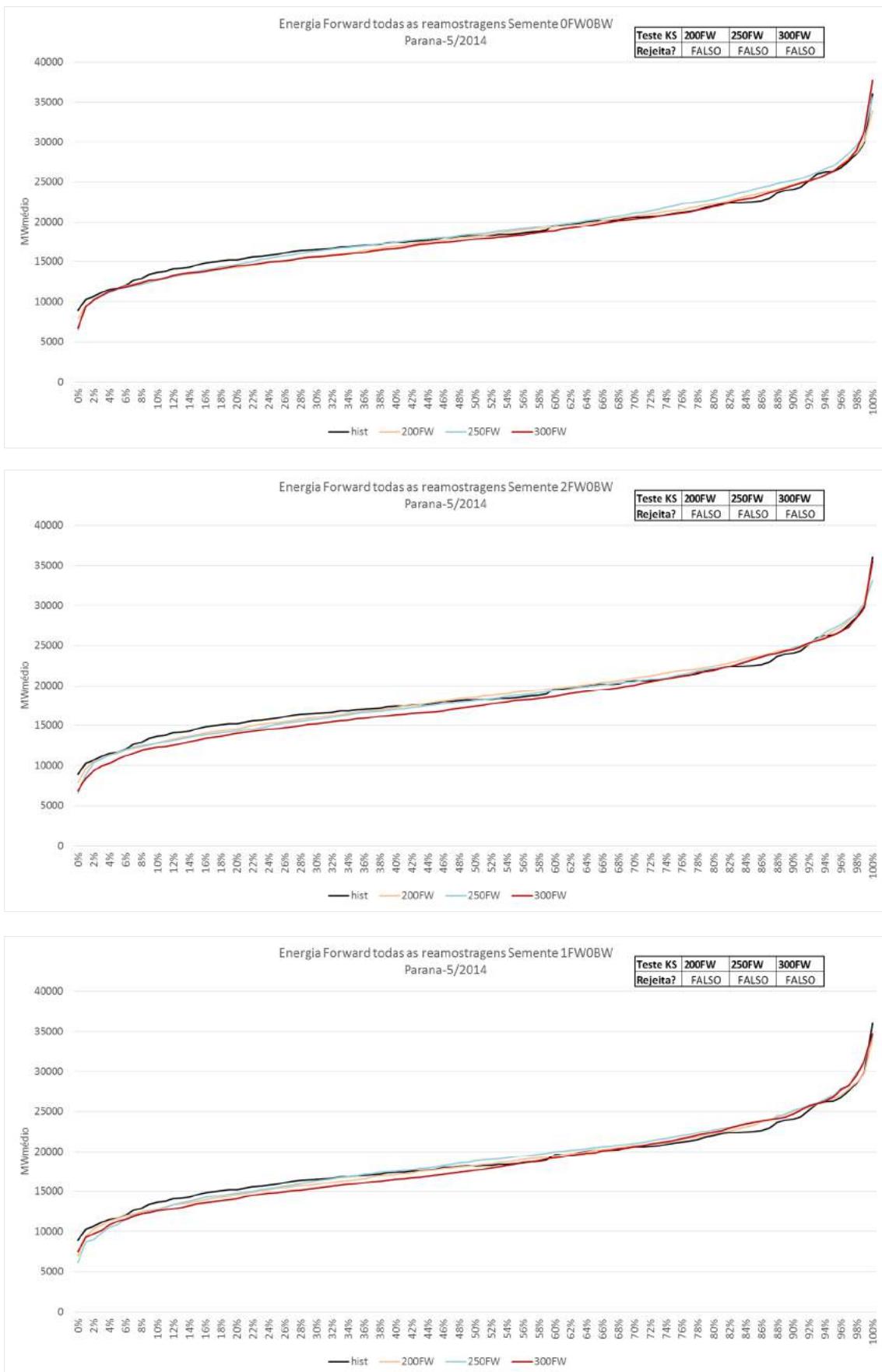


Figura 4.3 – Permanências da energia histórica e sintética da forward.

Para exemplificar, foram apresentadas as permanências da energia histórica e sintéticas para as sementes *forwards* 0, 1 e 2. Observa-se que as energias sintéticas são diferentes, mas têm comportamento similar. Nenhuma das permanências foi rejeitada pelo teste de hipóteses *Kolmogorov-Smirnov*, por outro lado, o aumento do número de *forwards* não tornou a série sintética mais aderente à histórica.

Para cada ano do horizonte de estudo, foi verificado se o teste de *Kolmogorov-Smirnov* rejeitava a hipótese nula, então, considerando os dados de todos os anos, calculou-se o percentual de rejeição por mês, apresentado na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 – Percentual de rejeição do teste de *Kolmogorov-Smirnov*.

Nº simulação	REE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
100	SUDESTE	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	0%
100	MADEIRA	0%	10%	5%	5%	0%	5%	20%	45%	35%	10%	0%	10%
100	TPIRES	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%
100	ITAIPU	0%	0%	0%	0%	0%	10%	10%	0%	0%	0%	0%	0%
100	PARANA	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	10%	15%	0%
100	SUL	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	0%
100	IGUACU	5%	0%	0%	15%	0%	0%	0%	0%	5%	5%	0%	0%
100	NORDESTE	0%	0%	10%	0%	20%	10%	10%	5%	5%	0%	5%	0%
100	NORTE	10%	0%	5%	0%	0%	10%	10%	15%	20%	10%	5%	5%
100	BMONTE	5%	0%	0%	0%	0%	10%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
100	MAN-AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
200	SUDESTE	0%	5%	5%	0%	0%	0%	5%	0%	5%	0%	0%	0%
200	MADEIRA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	35%	25%	5%	0%	0%
200	TPIRES	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%
200	ITAIPU	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	5%	0%	0%	5%	0%
200	PARANA	0%	0%	5%	0%	15%	0%	0%	0%	40%	20%	5%	0%
200	SUL	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
200	IGUACU	0%	0%	0%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
200	NORDESTE	0%	0%	5%	0%	15%	0%	5%	10%	5%	0%	5%	0%
200	NORTE	5%	0%	0%	5%	20%	15%	20%	30%	5%	15%	5%	5%
200	BMONTE	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
200	MAN-AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
250	SUDESTE	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	5%	0%
250	MADEIRA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	40%	20%	5%	0%	0%
250	TPIRES	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
250	ITAIPU	0%	0%	0%	0%	0%	20%	5%	0%	5%	0%	0%	0%
250	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	5%	10%	0%
250	SUL	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
250	IGUACU	5%	0%	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
250	NORDESTE	0%	5%	15%	0%	15%	0%	0%	0%	5%	5%	0%	0%
250	NORTE	15%	0%	0%	0%	30%	15%	15%	20%	5%	10%	10%	10%
250	BMONTE	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
250	MAN-AP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Nota-se tendência em rejeitar a hipótese nula no período seco em muitos REE. No entanto, ao aumentar o número de simulações *forward* não se observou tendência de redução do percentual de rejeição.

A seguir são apresentados os resultados para o deck do PDE 2026, considerando 20 aberturas *backward* e variando o número de simulações *forward*, para apenas uma semente, como representado na Figura 4.4.

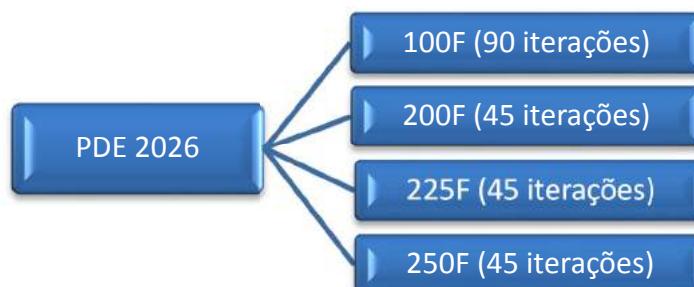


Figura 4.4 – Relação dos casos rodados.

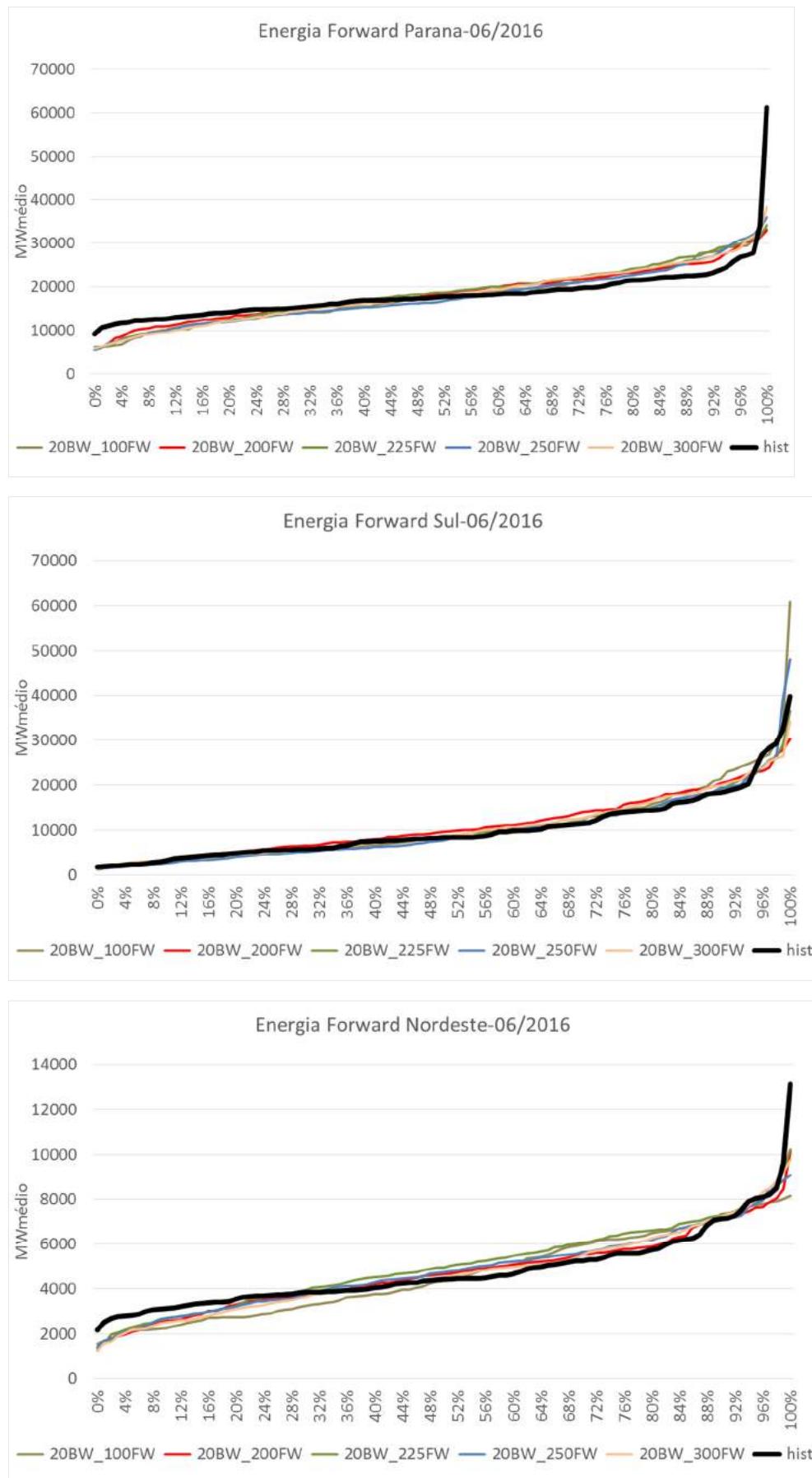


Figura 4.5 – Permanências da energia histórica e sintética forward.

A seguir a Tabela 4.2 mostra o percentual de rejeição da hipótese nula, considerando os 16 anos de estudo do PDE. Assim como no caso de leilão, não se observa tendência de redução do percentual de rejeição ao aumentar o número de simulações *forward*.

Tabela 4.2 – Percentual de rejeição do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Nº de simulações	REE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
100	PARANA	0%	6%	6%	6%	0%	13%	6%	0%	6%	6%	6%	0%
100	SUL	0%	0%	6%	0%	0%	0%	19%	13%	0%	0%	0%	0%
100	NORDESTE	0%	0%	13%	6%	6%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	0%
200	PARANA	6%	6%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	6%	13%	13%	0%
200	SUL	0%	0%	6%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	0%	0%	0%
200	NORDESTE	6%	0%	6%	0%	6%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
225	PARANA	0%	6%	0%	0%	0%	31%	0%	0%	6%	0%	0%	0%
225	SUL	6%	0%	0%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	0%	0%	0%
225	NORDESTE	0%	6%	6%	0%	13%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
250	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	6%	0%	0%	0%
250	SUL	6%	0%	0%	0%	0%	0%	31%	0%	0%	0%	0%	0%
250	NORDESTE	0%	0%	13%	0%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
300	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	31%	0%	0%	25%	0%	13%	0%
300	SUL	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
300	NORDESTE	0%	6%	0%	0%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

4.1.2. Backward

Foram simulados diversos casos de leilão alterando o número de aberturas *backward*, conforme ilustra a Figura 4.6 abaixo.

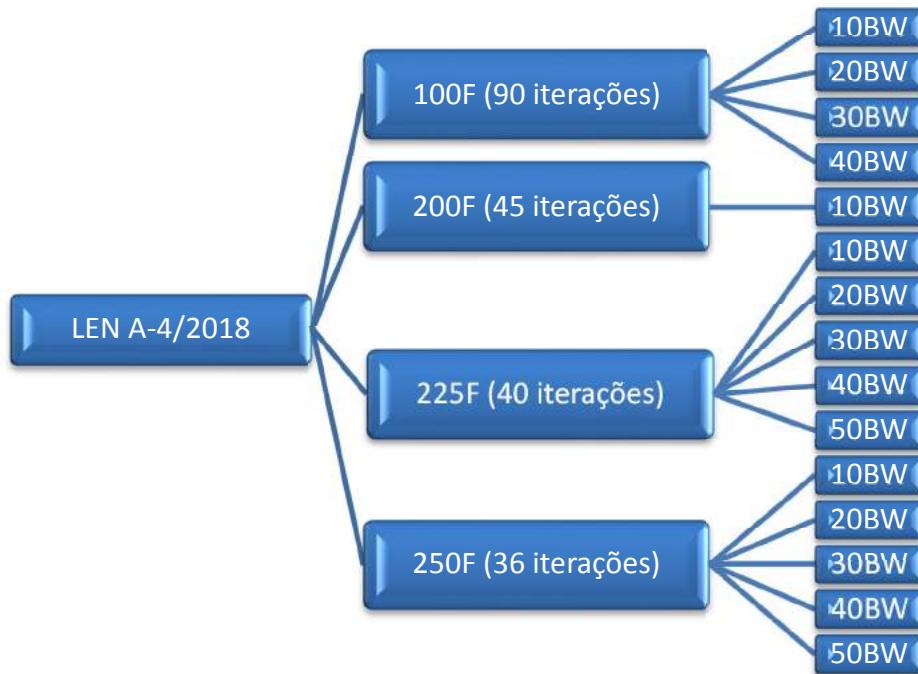


Figura 4.6 – Relação dos casos rodados.

A permanência considera todas as energias da *backward*, ou seja, se o caso tem 200 simulações *forward* e cada *forward* tem 20 *backward*, então são 20x200 dados.

A seguir, na Figura 4.7, são apresentadas as permanências da *backward* para alguns reservatórios equivalentes e períodos. Destaca-se que não se observa tendência das séries sintéticas se tornarem mais aderentes ao aumentar o número de aberturas *backwards*.

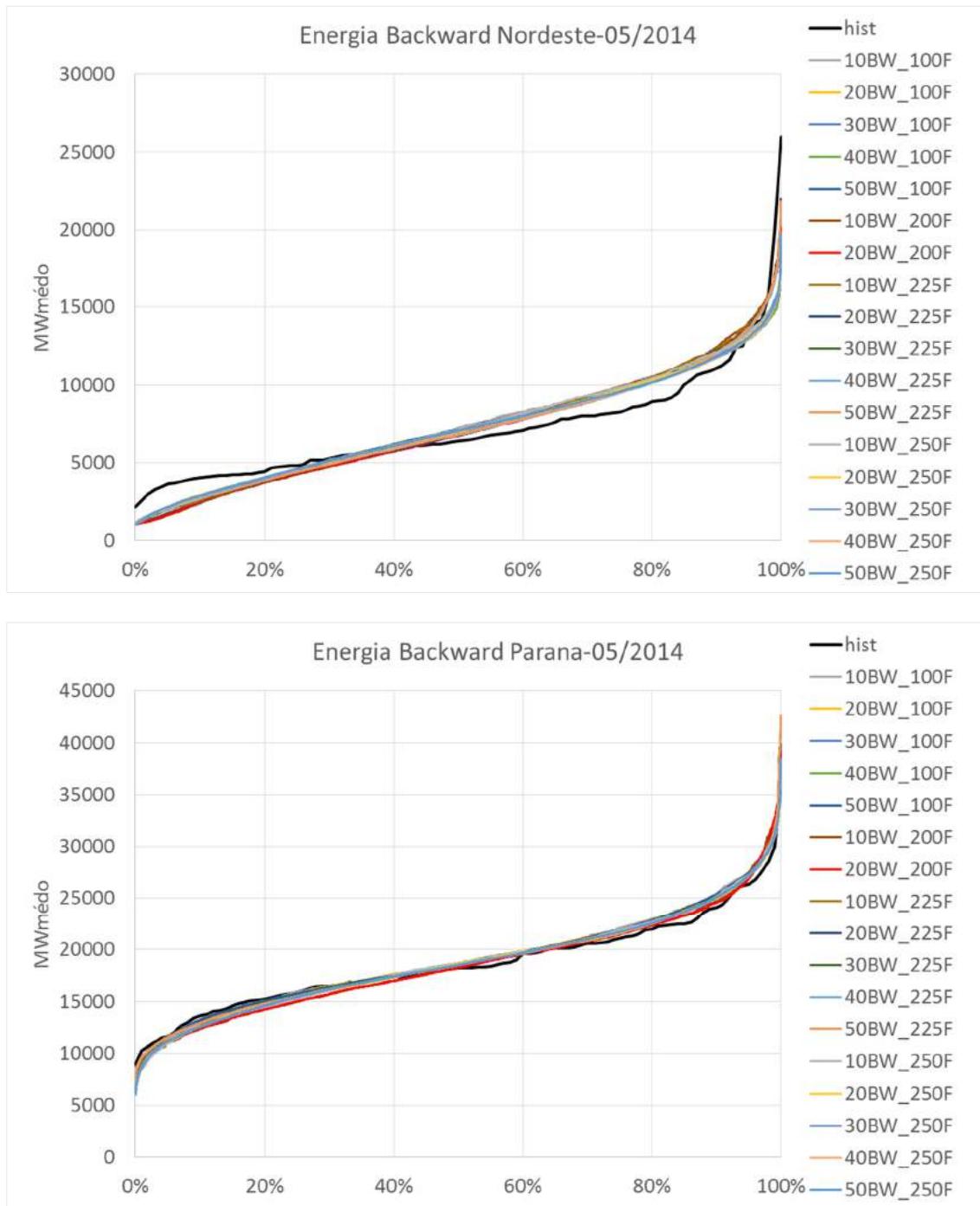


Figura 4.7 – Permanências da energia histórica e sintética *backward*.

A Tabela 4.3, abaixo, apresenta o percentual de rejeição do teste de *Kolmogorov-Smirnov*, considerando os anos de pré, estudo e pós (20 anos) para os reservatórios equivalentes de energia Paraná e Nordeste. Há tendência de maior rejeição nos meses maio, junho, setembro e outubro, mas ao elevar o número de aberturas *backward* não se nota redução deste percentual.

Tabela 4.3 – Percentual de rejeição do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Caso	REE	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
10BWx100FW	PARANA	0%	0%	10%	0%	0%	35%	0%	0%	80%	25%	5%	0%
10BWx100FW	NORDESTE	0%	10%	25%	5%	45%	15%	15%	25%	15%	10%	10%	0%
20BWx100FW	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	35%	5%	0%	65%	30%	10%	0%
20BWx100FW	NORDESTE	0%	5%	20%	0%	50%	20%	15%	25%	15%	10%	0%	0%
30BWx100FW	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	35%	0%	0%	70%	35%	10%	0%
30BWx100FW	NORDESTE	0%	0%	30%	0%	45%	25%	10%	25%	15%	10%	0%	0%
40BWx100FW	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	35%	5%	0%	65%	40%	10%	0%
40BWx100FW	NORDESTE	0%	5%	20%	5%	50%	25%	20%	25%	15%	10%	0%	0%
50BWx100FW	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	40%	5%	0%	65%	35%	10%	0%
50BWx100FW	NORDESTE	0%	0%	25%	0%	50%	25%	10%	25%	15%	10%	0%	0%
10BWx200FW	PARANA	0%	0%	5%	0%	0%	45%	0%	0%	60%	35%	10%	0%
10BWx200FW	NORDESTE	0%	10%	25%	5%	35%	5%	0%	15%	15%	5%	10%	0%
20BWx200FW	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	40%	0%	0%	70%	45%	5%	0%
20BWx200FW	NORDESTE	0%	0%	15%	5%	35%	5%	0%	15%	15%	10%	0%	0%
10BWx225Fw	PARANA	0%	0%	10%	0%	0%	40%	0%	0%	60%	20%	0%	0%
10BWx225Fw	NORDESTE	0%	0%	5%	5%	25%	10%	10%	5%	25%	0%	0%	0%
20BWx225Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	55%	30%	0%	0%
20BWx225Fw	NORDESTE	0%	0%	5%	5%	20%	5%	10%	15%	20%	0%	0%	0%
30BWx225Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%	50%	25%	0%	0%
30BWx225Fw	NORDESTE	0%	0%	0%	5%	25%	5%	10%	15%	25%	0%	0%	0%
40BWx225Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%	50%	15%	0%	0%
40BWx225Fw	NORDESTE	0%	0%	10%	0%	20%	5%	10%	15%	20%	0%	0%	0%
50BWx225Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	55%	15%	0%	0%
50BWx225Fw	NORDESTE	0%	0%	10%	0%	20%	10%	10%	15%	20%	0%	0%	0%
50BWx225Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	55%	15%	0%	0%
50BWx225Fw	NORDESTE	0%	0%	10%	0%	20%	10%	10%	15%	20%	0%	0%	0%
50BWx225Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	55%	15%	0%	0%
50BWx225Fw	NORDESTE	0%	0%	10%	0%	20%	10%	10%	15%	20%	0%	0%	0%
10BWx250Fw	PARANA	0%	0%	5%	0%	0%	45%	0%	0%	70%	25%	5%	0%
10BWx250Fw	NORDESTE	0%	20%	15%	0%	20%	15%	0%	10%	5%	10%	0%	0%
20BWx250Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	70%	30%	5%	0%
20BWx250Fw	NORDESTE	0%	10%	10%	5%	15%	15%	0%	20%	5%	10%	0%	0%
30BWx250Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%	75%	25%	5%	0%
30BWx250Fw	NORDESTE	0%	10%	5%	0%	20%	15%	0%	20%	5%	5%	0%	0%
40BWx250Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	70%	15%	0%	0%
40BWx250Fw	NORDESTE	0%	0%	5%	0%	15%	15%	0%	15%	5%	10%	0%	0%
50BWx250Fw	PARANA	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	75%	20%	0%	0%
50BWx250Fw	NORDESTE	0%	0%	10%	0%	15%	15%	0%	15%	5%	10%	0%	0%

Considerando as análises acima, sob o ponto de vista de aderência das séries sintéticas de energia natural afluente à histórica, não há justificativa para aumentar o número de aberturas *backward* ou de simulações *forward*.

4.2. Análise do impacto na política operativa

4.2.1. Com o aumento do número de *Forward*

Esta seção apresenta uma avaliação na política operativa ao se alterar o número de cenários para a simulação *forward*, para um caso típico de cálculo de garantias físicas (estático, com 10 anos de período de pré-estudo, 5 anos de período de planejamento e 5 anos de período pós).

O caso de referência utilizado é o Caso Base para o LEN A-4/2018 [15], no qual são considerados 12 reservatórios equivalentes de energia, CVaR com parametrização (50,40), 200 simulações *forward* e 20 aberturas para as recusões *backward* utilizadas na construção da política de operação.

Nos gráficos a seguir, “Ref” é utilizado para designar o caso de referência executado na versão 25.6 do modelo NEWAVE com 45 iterações fixas, sem reamostragem e considerando o elemento mais próximo ao centroide como representante do processo de agregação de ruídos. Os demais resultados se referem ao caso de referência executado na mesma versão, porém utilizando-se reamostragem plena com passo 01 e centroide, variando-se o número de cenários *forward* de 200 para 250 e 300.

Observa-se, entre os casos apresentados, igualdade estatística, para o intervalo de confiança com 95% para uma distribuição normal:

- i. Na Figura 4.8, para os valores de custo total de operação referenciado ao 1º ano do período de planejamento;
- ii. Na Figura 4.9, para os valores de custo de déficit e custo de geração térmica;
- iii. Na Figura 4.10, para os valores de custo marginal de operação médio no período de planejamento.

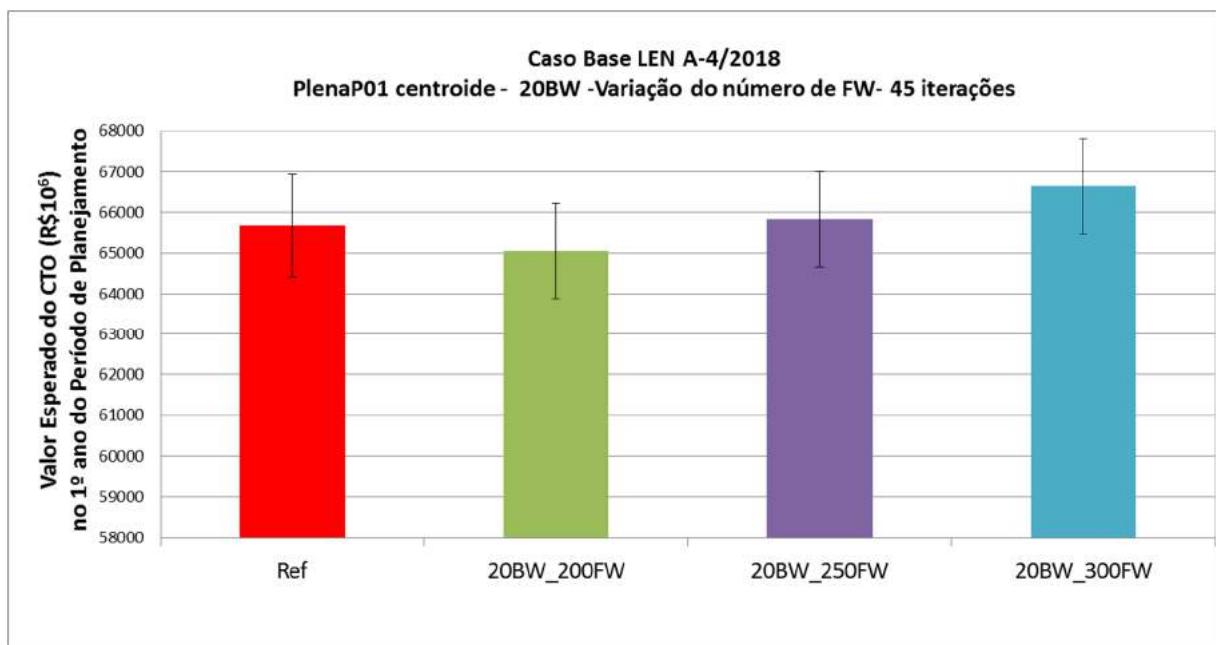


Figura 4.8 – Valor esperado do Custo Total de Operação – PlenaP01 - Centroide – Variação do número de *forward* - Caso Base LEN A-4/2018.

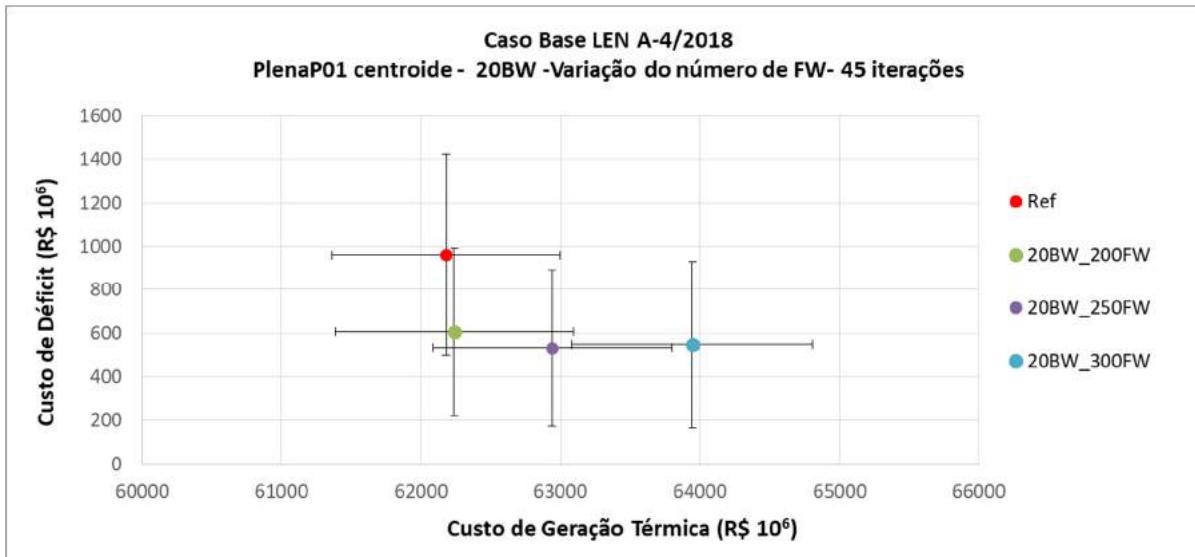


Figura 4.9 – Diagrama de Dispersão: custo de geração térmica versus custo de déficit - PlenaP01 - Centroide - Variação do número de forward - Caso Base LEN A-4/2018.

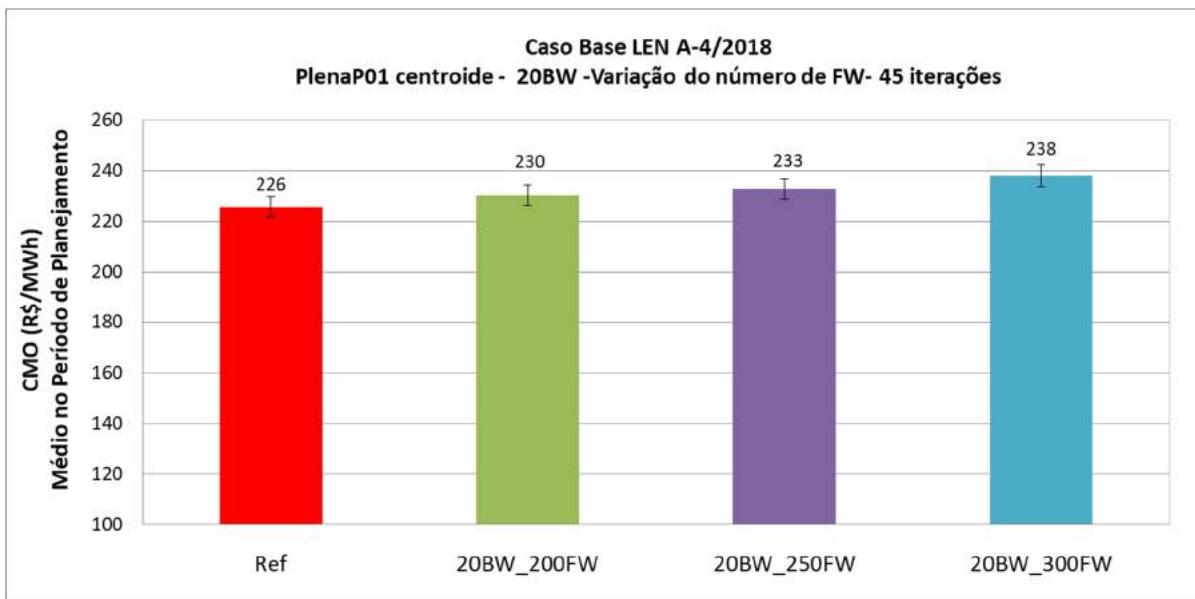


Figura 4.10 – Custo Marginal de Operação médio no período de planejamento - PlenaP01 - Centroide - Variação do número de forward - Caso Base LEN A-4/2018.

Portanto, para as variáveis apresentadas, é indiferente aumentar o número de cenários para as simulações *forward*. Entretanto, ao se observar, na Figura 4.11, os valores de ZINF na 45^a iteração, os valores parecem diferentes. No entanto, como os valores tem uma incerteza associada, foram rodados 11 casos com diferentes sementes, tanto sementes *backward* quanto sementes *forward*, observamos, na Figura 4.12, que os valores de ZINF obtidos na 45^a iteração para 200 e 250 cenários *forward* são estatisticamente distintos.

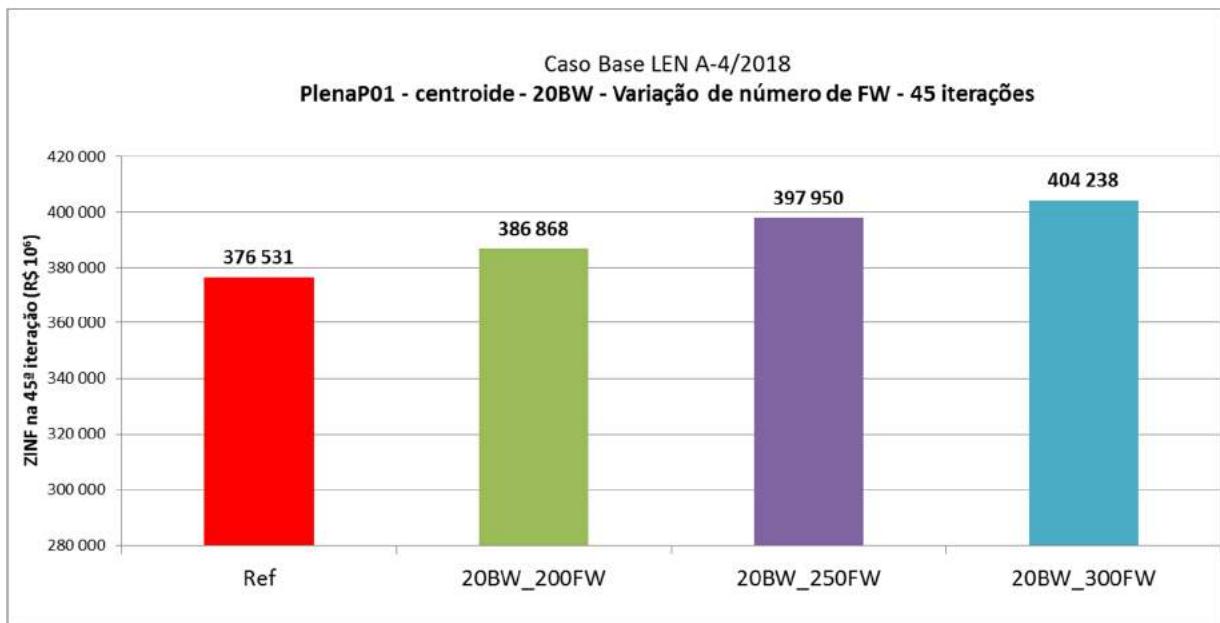


Figura 4.11 – ZINF na 45^a iteração – PlenaP01 - Centroide – Variação do número de *forward* - Caso Base LEN A-4/2018.



Figura 4.12 – ZINF na 45^a iteração - PlenaP01 – Centroide – Variação do número de *forward* - Variação de sementes backward e de sementes forward - Caso Base LEN A-4/2018.

Por fim, ao se contabilizar o tempo total de execução, na Figura 4.13 se observa que o tempo de execução dobrou para o caso de garantia física. Assim, conclui-se que não é viável adotar um incremento de 50 no número de cenários *forward* por limitação computacional e dos processos em que os casos são utilizados.

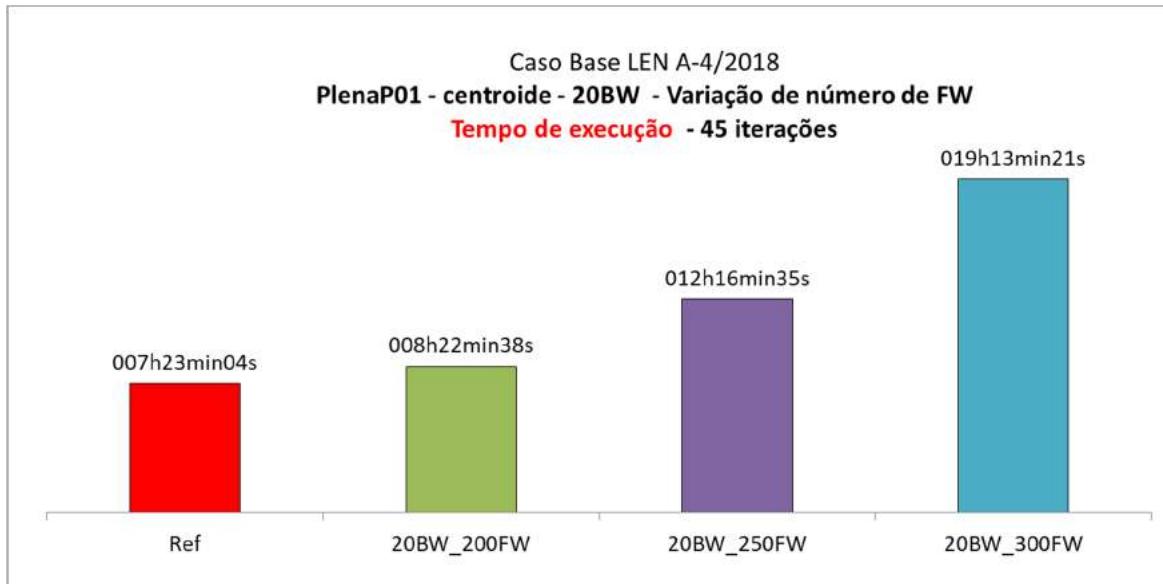


Figura 4.13 – Tempo de execução - PlenaP01 - Centroide - Variação do número de *forward* - Caso Base LEN A-4/2018.

4.2.2. Com o aumento do número de *Backward*

Após a avaliação do uso do centroide e da reamostragem plena, passo 1, a fim de verificar se o atual número de *backward* continuava adequado com o uso dessas implementações, realizamos estudos variando as sementes *backward* nos PMOs de julho/14 e outubro/18.

Todos os casos rodados são neutros ao risco, com reamostragem plena, passo 1, nº mínimo de iterações igual a 45, variando-se o número de *backward* em 20, 30, 40 e 50, para cada uma das 20 sementes *backward* testadas.

A Figura 4.14 demonstra os resultados obtidos para o PMO de julho/14, onde não foi possível observar redução do custo total de operação, com todos os valores dentro do intervalo de confiança.

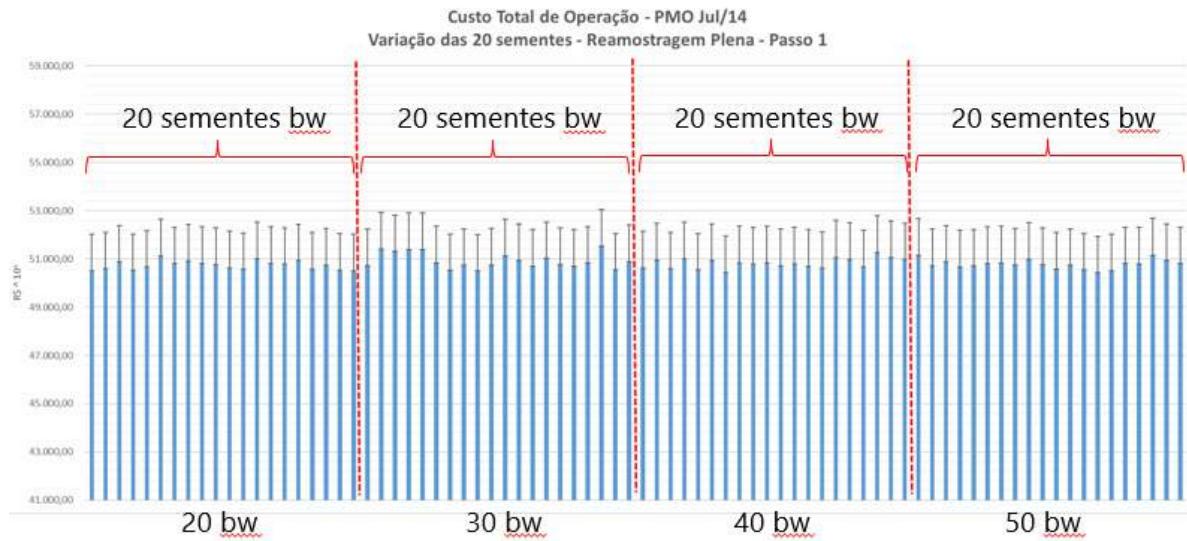


Figura 4.14 – Custo total de operação em cada uma das 20 sementes backward - PMO Julho/2014.

O mesmo comportamento é observado na Figura 4.15, agora no PMO de outubro/2018.

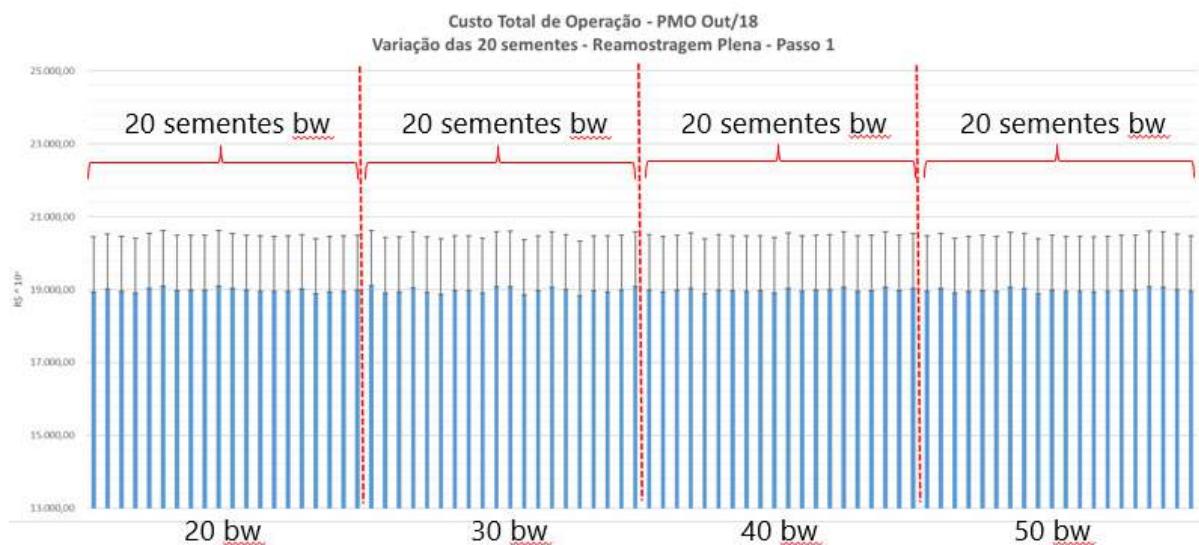


Figura 4.15 – Custo total de operação em cada uma das 20 sementes backward - PMO Outubro/2018.

Conclui-se que, independentemente do nº de *backward* escolhido, não há ganhos na redução do custo total de operação. Assim, não recomendamos o aumento do nº de *backward* neste ciclo de trabalho.

4.3. Conclusão

Das análises realizadas, observou-se que não há ganho em se aumentar o número de *backward*. Embora verifique-se ganho em aumentar o número de *forward*, este é pouco significativo e o tempo computacional adicional requerido não compensa. Portanto, o GT-Metodologia recomenda manter o número de *backward* em 20 e o número de *forward* em 200.

5. Critério de Parada

Após as definições referentes à implantação do processo de reamostragem no modelo NEWAVE, ou seja, metodologia de reamostragem plena e passo 1, tornou-se necessário reavaliar outros conceitos e parâmetros adotados pelo modelo. Dentre eles se destaca o critério de parada para o algoritmo PDDE.

Com esse propósito, foi avaliado se haveria necessidade de alterar o número mínimo de iterações, o número máximo de iterações, a frequência do cálculo do delta de ZINF, o valor de tolerância aceito para o delta de ZINF e o número de iterações sucessivas em que seria aplicado o critério.

Após avaliar os resultados de vários casos, concluímos que o delta de ZINF deveria ser calculado a cada p-iterações, onde p é o passo da reamostragem, de forma a avaliar o ganho obtido antes de uma nova reamostragem da *forward*. Isto é, para p=3, por exemplo, $\text{deltaZINF}_6 = \text{ZINF}_6 - \text{ZINF}_3$, $\text{deltaZINF}_9 = \text{ZINF}_9 - \text{ZINF}_6$ e assim, sucessivamente. Entretanto, como foi escolhida a reamostragem plena da *forward* com passo 01, não houve alteração em relação a frequência de avaliação do delta de ZINF no critério de parada vigente. Adicionalmente, o valor aceito de tolerância para o delta de ZINF e o número de iterações sucessivas em que se aplica o critério também se mostraram adequados ao se considerar a reamostragem plena da *forward* com passo 01.

O número máximo de iterações também foi avaliado, entretanto, optou-se por manter o número atual, 45, devido a restrições associadas ao tempo computacional, apesar de constatar que o avanço no processo iterativo além 45 iterações pode incorrer em aumento da qualidade da função de custo futuro do modelo. Nesse sentido, entende-se que esse limite máximo de iterações poderia ser reavaliado diante de aprimoramentos de hardware e de metodologias que aumentem a eficiência computacional, contribuindo assim para a redução do tempo de simulação.

Em relação ao número mínimo de iterações, observou-se, nos casos de PMO, PLD, GF e PDE, que a trajetória do ZINF começava a apresentar variações, entre iterações sucessivas, menos significativas, em geral, a partir da 30/35^a iteração.

Para ilustrar esse comportamento, a Figura 5.1 apresenta a evolução do ZINF ao longo das iterações do algoritmo da PDDE, com e sem reamostragem da *forward*, ambos com centroide, para os seguintes casos: PLD de junho/2018, caso base para o LEN A-4/2018 e PDE 2026.

Observa-se, ao se considerar a reamostragem plena da *forward* com passo 01, crescimento do valor de ZINF ao longo das iterações, decorrente de uma avaliação mais abrangente, pela simulação *forward*, da árvore de cenários de afluências aos REEs no algoritmo de PDDE. Para o PLD junho/18, isso ocorre a partir da 11^a iteração, para o caso base para o LEN A-4/2018 a partir da 6^a iteração e para o PDE 2026 desde a 1^a iteração.

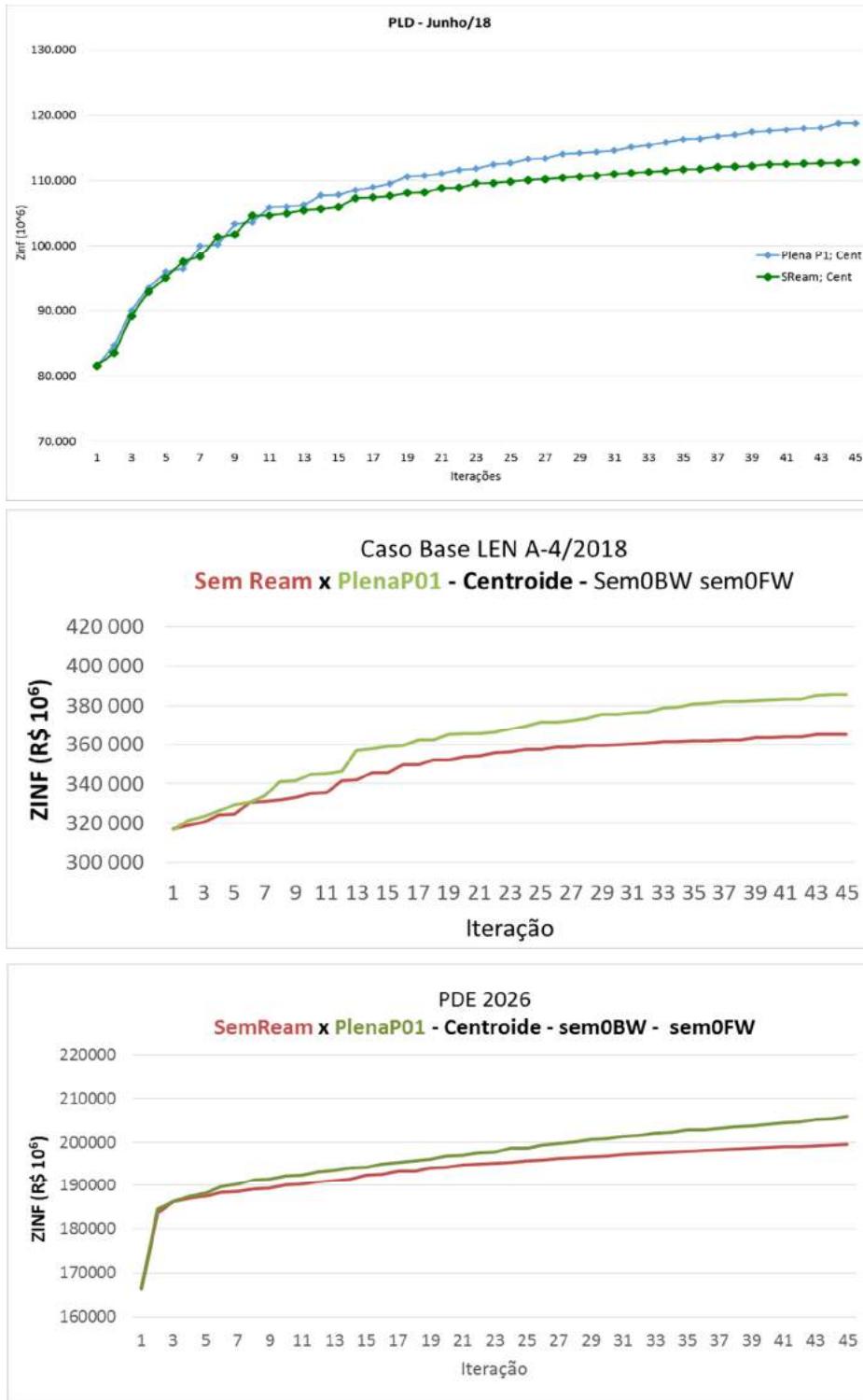


Figura 5.1 – Evolução do ZINF ao longo das iterações do algoritmo de PDDE.

Na Figura 5.2, observa-se que quando não se adota a reamostragem, os valores de delta de ZINF tendem a diminuir mais rapidamente do que quando se adota a reamostragem. Em princípio, este comportamento indicaria que com reamostragem seria necessário um número maior de iterações para se obter o mesmo patamar de variação do delta de ZINF do caso sem reamostragem.

Contudo, como já observado na Figura 5.1, a partir da 12^a iteração para o caso do PLD de junho/2018, por exemplo, o valor do ZINF calculado pela reamostragem plena é sempre superior ao

do caso sem reamostragem. Esse comportamento resulta em uma FCF de melhor qualidade, uma vez que uma árvore de cenários mais completa foi avaliada com o uso da reamostragem da forward.

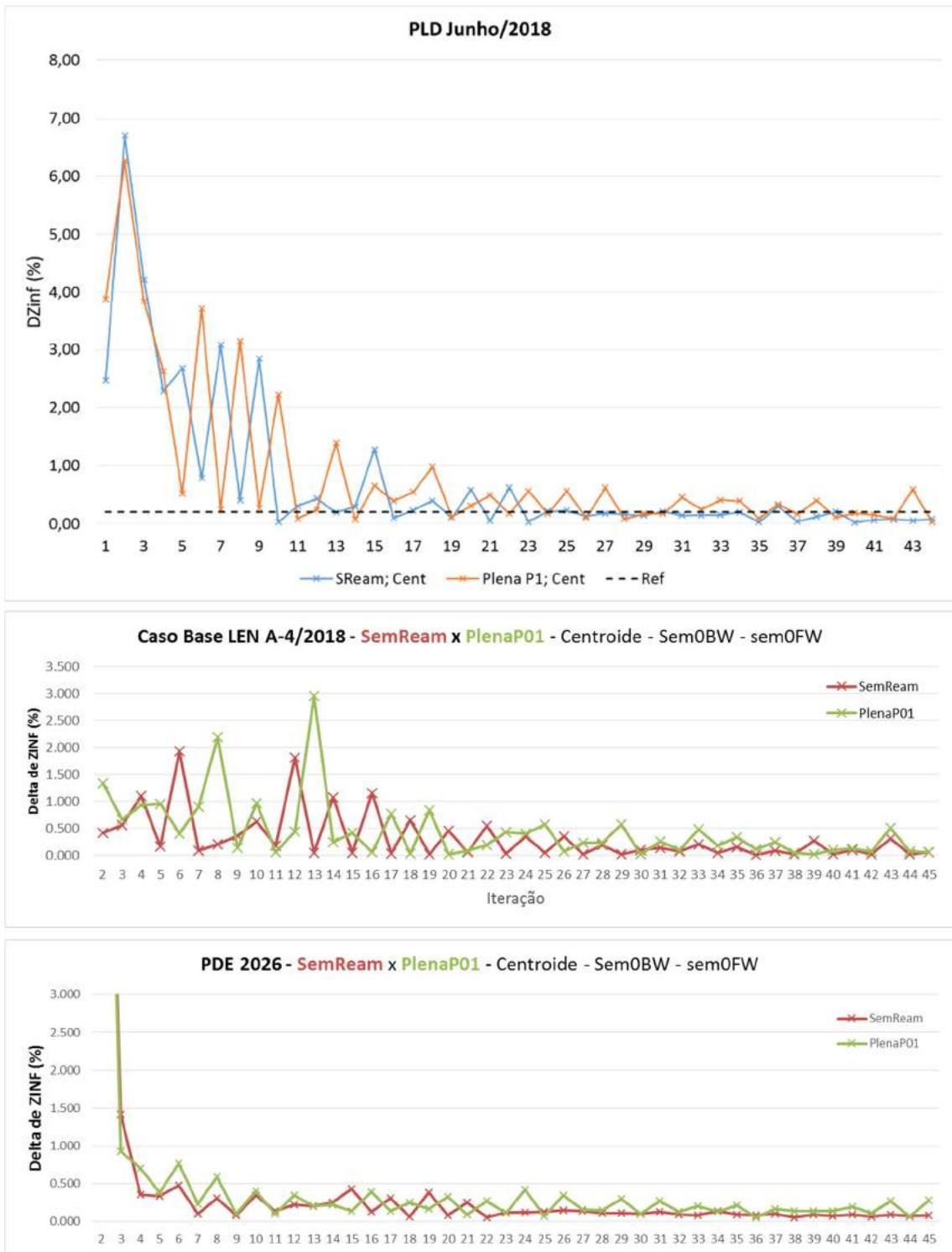


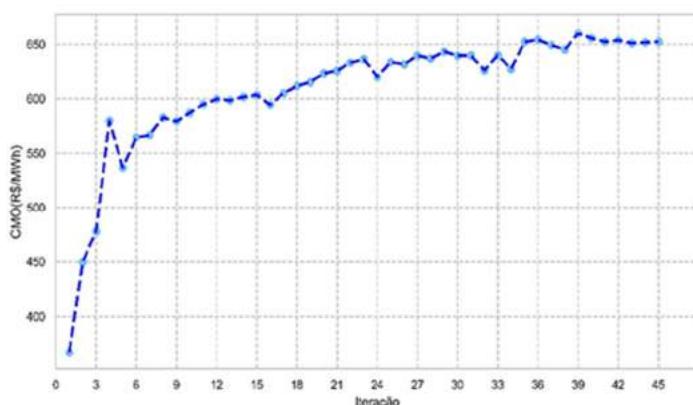
Figura 5.2 – Evolução do delta de ZINF ao longo das iterações do algoritmo de PDDE.

Assim, com o propósito de avaliar a partir de qual iteração pode-se concluir que não há alteração significativa nos resultados do modelo, em específico, no custo marginal da operação (CMO), faz-se necessário realizar um teste estatístico que permita avaliar essa hipótese. Para esta tarefa, foi adotado, como referência, um teste estatístico de diferença entre médias de amostras

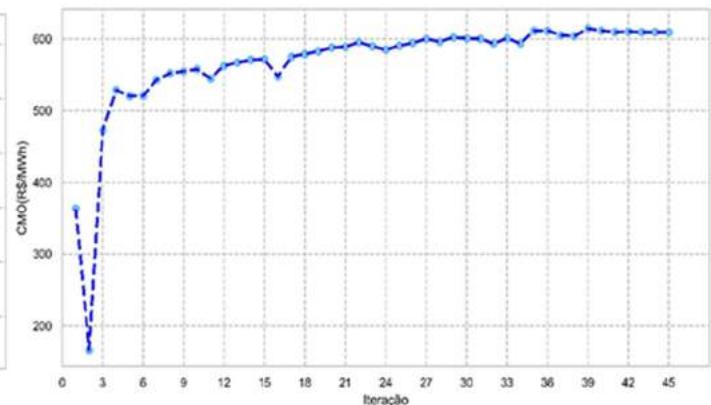
independentes, utilizando a estatística de teste *T-Student* (Teste-T), o detalhamento desta aplicação é apresentado na seção 9.2.

Os resultados que são apresentados a seguir consideraram as rodadas do modelo NEWAVE com os aprimoramentos da reamostragem plena, passo 1, semente 0 e o uso do centroide, essa mesma simulação considerou um número mínimo e máximo de iterações igual a 45.

Para realizar o Teste-T foi executada uma sequência de rodadas do modelo NEWAVE com a funcionalidade conhecida como Pseudo Partida-Quente (PPQ), que permite executar simulações considerando cortes construídos até determinada iteração definida pelo usuário. Os resultados da simulação com a PPQ são apresentados na Figura 5.3, onde é possível observar o comportamento do CMO ao longo das iterações, conforme a FCF é construída. Por exemplo, para o submercado Sudeste do caso PLD de junho/18, a partir da 41^a não se observam variações significativas no valor do CMO. Para o caso base do LEN A-4/2018, se observa uma certa estabilidade a partir da iteração 30.



(a) CMO do Sudeste - PLD junho/2018



(b) CMO do Nordeste - PLD junho/2018

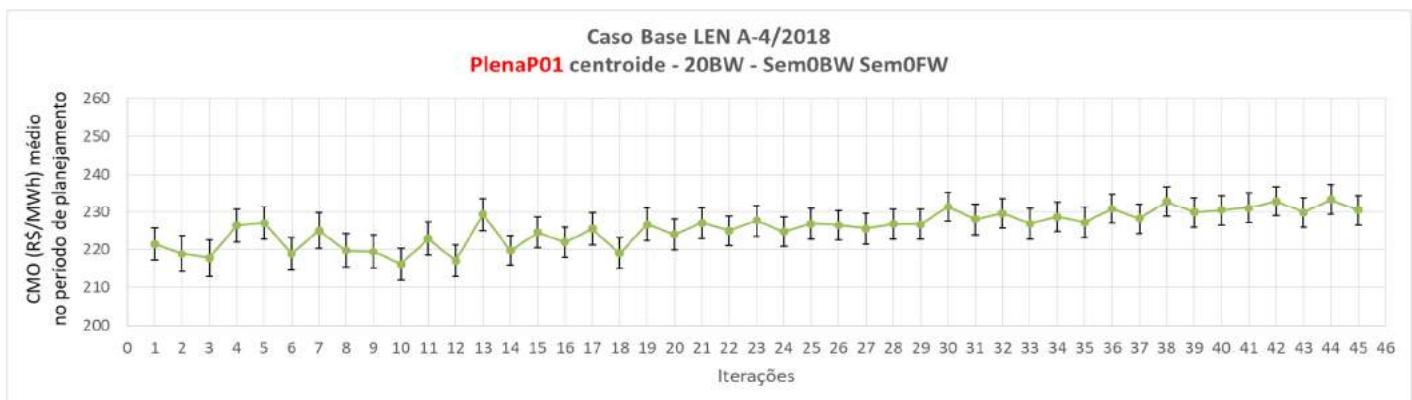


Figura 5.3 – CMO ao longo das iterações

Com as informações obtidas com a execução da PPQ, é possível realizar o Teste-T, cujos resultados para as estatísticas obtidas são apresentados na Figura 5.4, na Figura 5.5, na Figura 5.6 e na Figura 5.7 em que se comparam os valores críticos de confiança de 95% e 99%.

O Teste-T permite avaliar as estatísticas de teste obtidas para as simulações considerando cortes construídos até uma determinada iteração. Essa avaliação é realizada comparando o CMO médio obtido com aqueles obtidos em iterações posteriores.

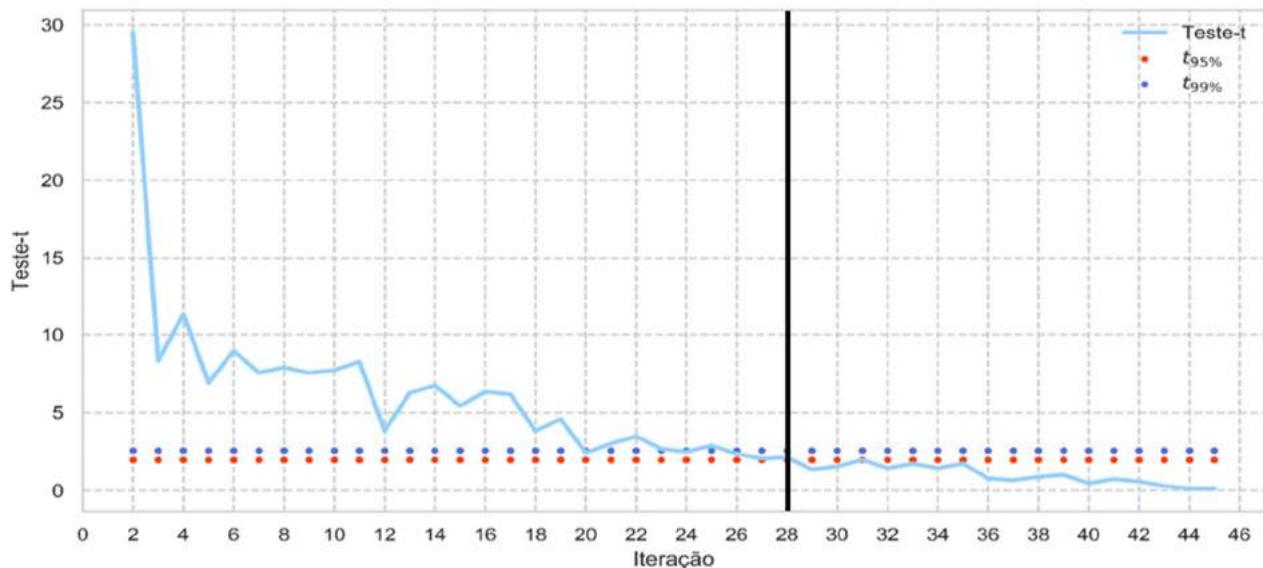


Figura 5.4 – PLD de junho/2018 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.

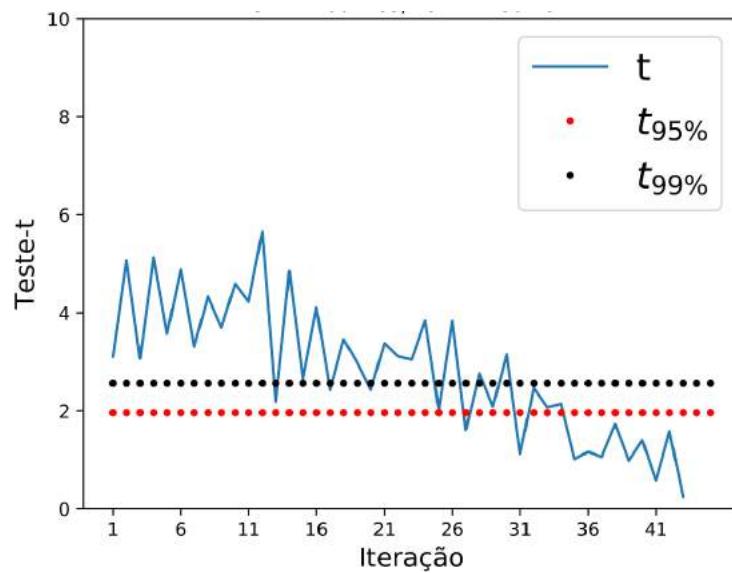


Figura 5.5 – Caso Base do LEN A-4/2018 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.

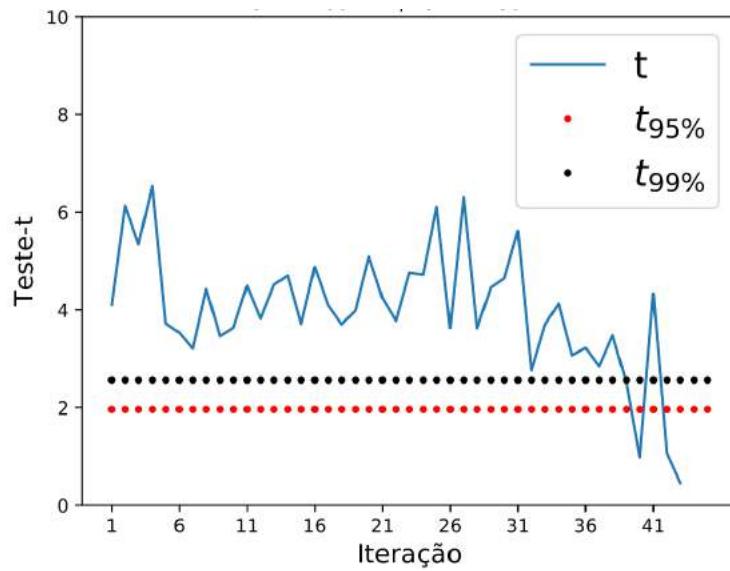


Figura 5.6 – PDE 2026 - Ano 2026 - SE - Patamar 1 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.

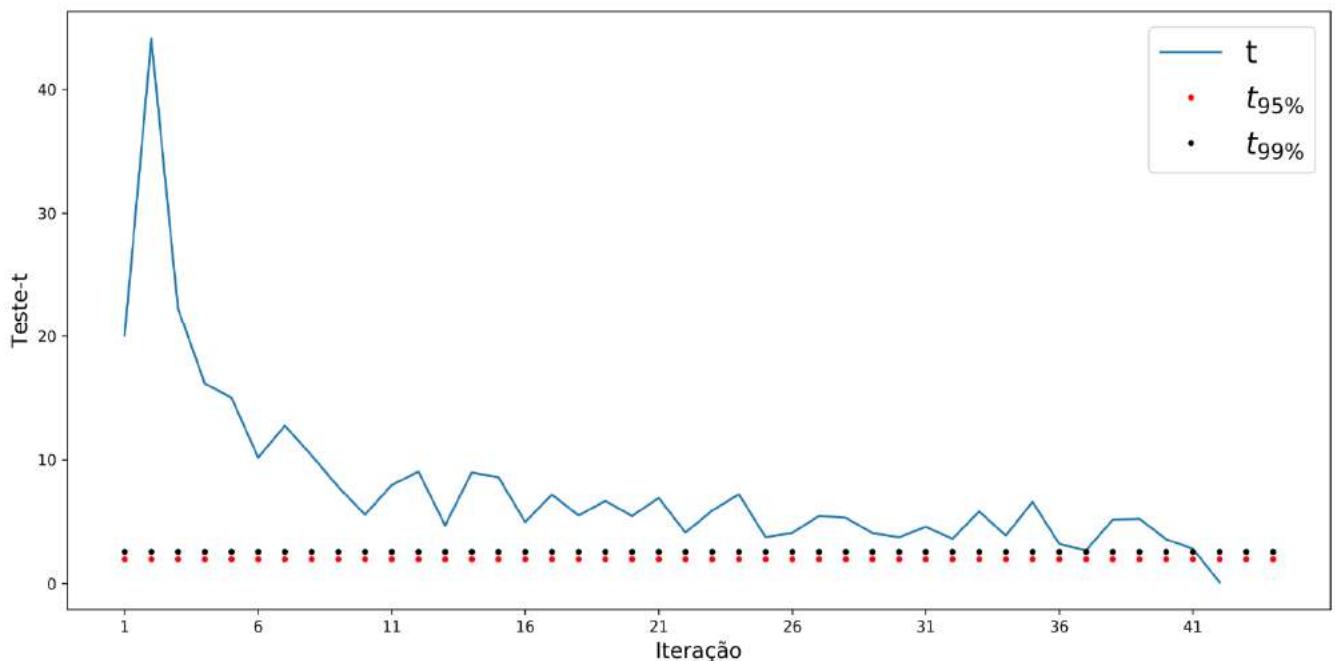


Figura 5.7 – PDE 2027 - Ano 2023-2027 - SE - Patamar 1 - Máximo valor da estatística de teste por iteração.

Assim, os resultados mostram que antes da 28^a iteração para o PLD junho/2018, 31^a iteração para o caso base LEN A-4/2018 e 42^a iteração, tanto para o PDE 2026 quanto para o PDE 2027, é pouco provável que se obtenha um resultado de CMO médio que não se altere significativamente caso se realize mais iterações para construção da política. Portanto, decidiu-se que a iteração mínima seria a 30^a.

Analisando-se todos os anos do período de planejamento do PDE 2026, o teste –T identificou, no mínimo, a 39^a iteração como aquela a partir da qual o valor de CMO médio se estabiliza. Para o PDE 2027, observa-se que o teste-T identifica para o primeiro patamar, em todos os anos, iteração superior a 41, exceto para o ano de 2027. Portanto, para os casos de PDE será mantida a iteração mínima como 45.

6. Aperfeiçoamentos no processo de geração de cenários no modelo GEVAZP para o DECOMP

6.1. Metodologia

À medida que as investigações para reduzir a variabilidade amostral na geração de cenários para aplicação no planejamento de médio/longo prazo foram se concretizando em aprimoramentos na metodologia atual, tais melhorias foram sendo incorporadas ao modelo de geração para a aplicação no planejamento de curto prazo. O CEPEL elaborou um relatório técnico intitulado “Avaliação do uso do centroide no processo de agregação da Amostragem Seletiva na geração de cenários de afluências para o planejamento da operação de curto prazo” [8], onde são apresentados: o processo atualmente considerado e as modificações realizadas de forma a compatibilizar a geração de cenários sintéticos de afluência nos planejamentos de médio/longo (agregação em ruídos) e curto prazos (agregação em vazões),, além de avaliações sobre a qualidade dos cenários sintéticos de afluência e seus impactos na operação de curto prazo.

A metodologia proposta para a geração dos cenários de vazões/energias naturais afluentes às usinas, utilizada no planejamento de curto prazo, é similar àquela já descrita no item 3na seção 2 deste relatório e está ilustrada de forma sucinta no esquema da Figura 6.1. Na metodologia atualmente empregada na geração dos cenários para o DECOMP [9], a agregação dos cenários é aplicada diretamente nos cenários de vazões afluentes e não na amostra original de ruídos e, além disso, outro ponto de diferença em relação ao Newave é o. O tamanho da amostra original que está limitado a 1000 vetores multivariados de vazões, enquanto o Newave utiliza 100.000 objetos.

Vale ressaltar, que as modificações propostas não impactam diretamente o modelo DECOMP, dado que o conjunto de cenários de afluências é um dado externo ao modelo.

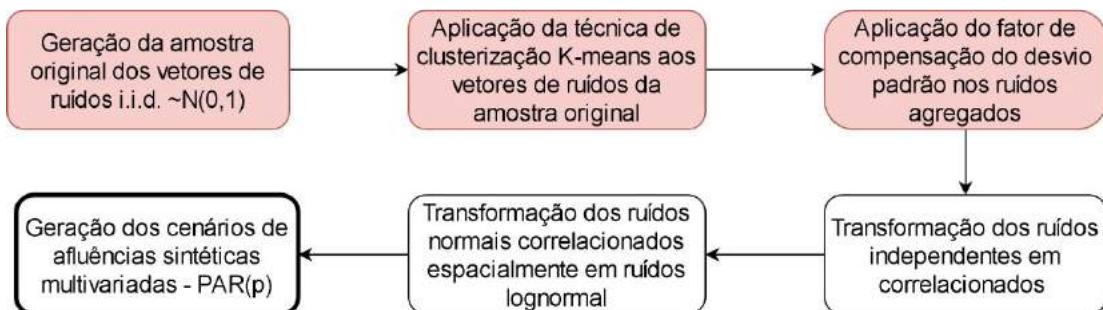


Figura 6.1 – Proposta para geração de cenários para o curto prazo - Esquema resumido.

A representação da incerteza hidrológica no modelo de planejamento da operação energética de curto prazo, DECOMP, é feita através de uma árvore de cenários de afluências. Considerando as novas implementações, durante a geração da árvore de afluências, a agregação dos ruídos é realizada apenas uma vez por período e o representante dos grupos formados durante o processo de agregação passa a ser o centroide, em vez do elemento mais próximo do centroide de cada cluster. A partir do segundo período de geração, os ruídos agregados são repetidos para todos os ramos da árvore, assim como mostrado na Figura 6.2

Erro! Fonte de referência não encontrada..

O tamanho da amostra original que será utilizada no processo de agregação também foi revisto

de 1000 objetos para 50.000 de forma a representar melhor o espaço amostral da distribuição multivariada.

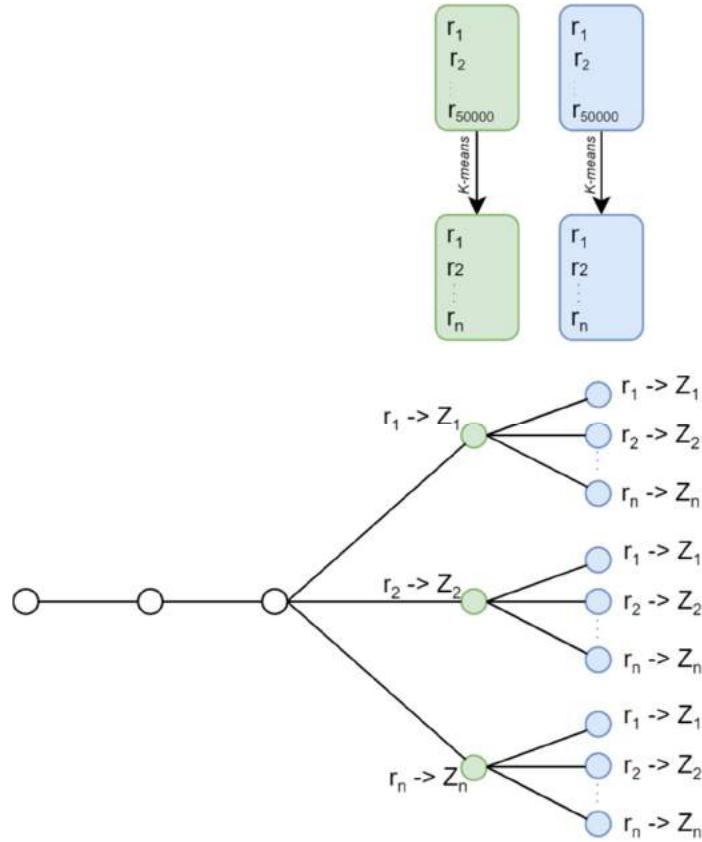


Figura 6.2 – Construção da árvore de cenários para o DECOMP com agregação dos ruídos.

Conforme mencionado anteriormente, no relatório técnico [8] são apresentados testes sobre a qualidade dos cenários de vazões multivariadas, onde os valores gerados foram comparados com seus respectivos valores teóricos (valores condicionados). Foi utilizado um “índice de similaridade”, definido como a razão das estatísticas agregadas pelos respectivos valores teóricos, onde quanto mais próximo do valor unitário, melhor o processo de geração/agregação. Analisando os resultados do boxplot para média e desvio padrão deste índice apresentados na Figura 6.3**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode-se observar que a aplicação da agregação nos ruídos, a consideração do centroide como representante do cluster e o aumento do tamanho da amostra original proporcionaram um acréscimo na qualidade dos cenários gerados (original x cent-50K).

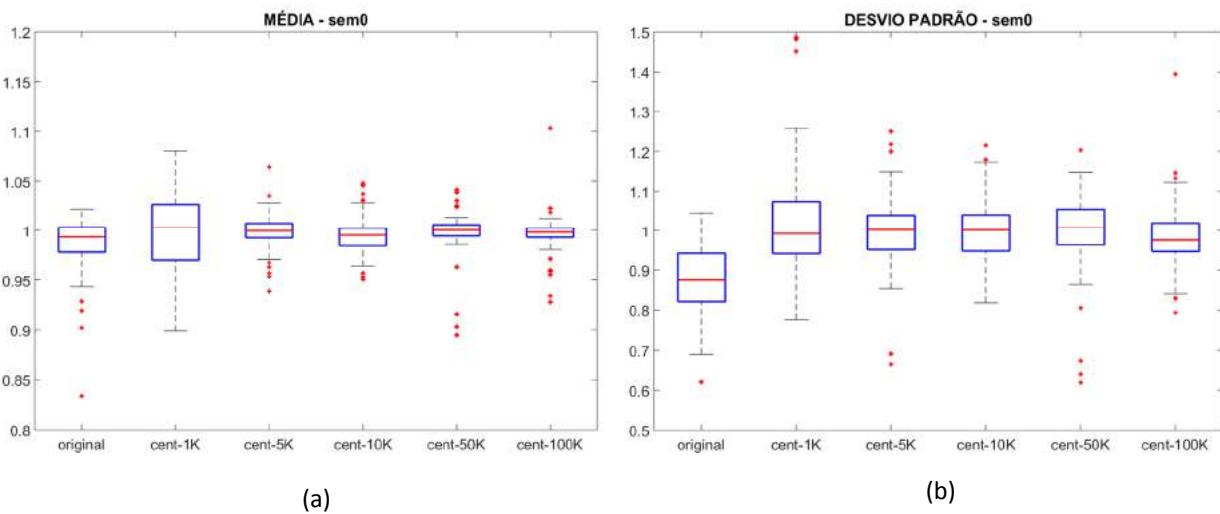


Figura 6.3 – Índice de similaridade para a média (a) e para o desvio padrão (b) para o PMO Fev/2019, Rev 2.

Na Figura 6.4**Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentada a distribuição acumulada de frequência dos cenários de Energia Natural Afluente (ENA) do subsistema Sudeste, calculadas a partir das vazões geradas para o PMO de fevereiro de 2019. A Figura 6.4**Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a) apresenta os resultados obtidos com a agregação nas vazões e com 1000 objetos (tradicional) para as 10 sementes distintas, e a Figura 6.4**Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b) os resultados com a utilização da agregação nos ruídos, com o centroide como representante do cluster, e amostra original de 50 mil objetos. É possível observar que há uma maior dispersão das curvas no gráfico (a) em comparação com o (b). Pode-se então afirmar que a metodologia proposta diminuiu a variabilidade amostral apresentada em (a).

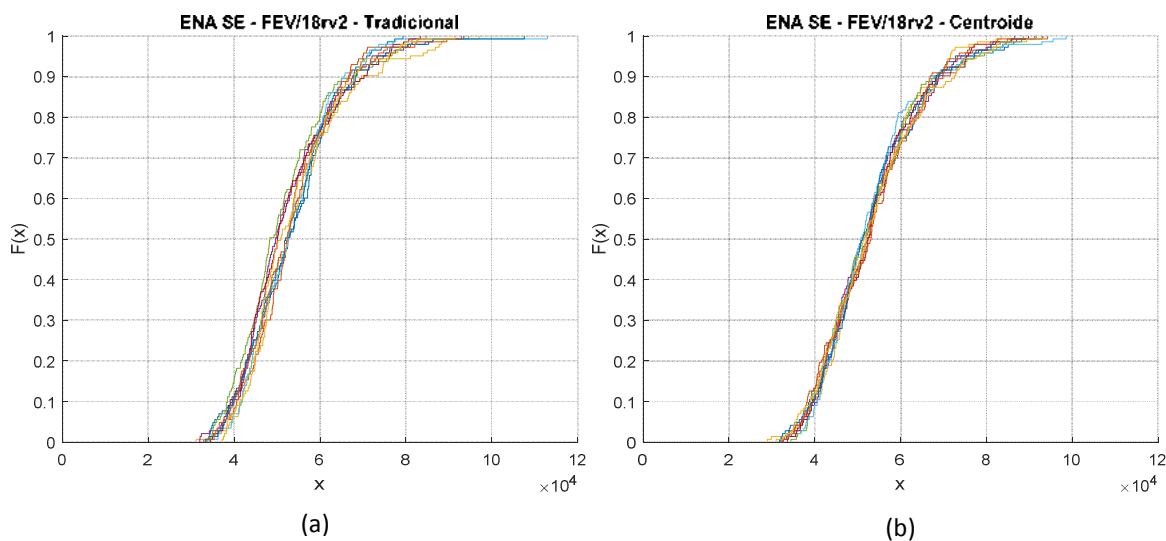


Figura 6.4 – Distribuição de frequência acumulada das 10 sementes geradas utilizando a metodologia oficial (a) e a proposta (b) para o PMO Fevereiro/2019, Rev 2.

Adicionalmente, foi realizada uma avaliação dos resultados do planejamento da operação energética dos cenários de vazões afluentes, considerando todos os PMOs desde janeiro de 2014 até fevereiro de 2019, com a metodologia utilizada oficialmente para a geração de cenários, e a metodologia proposta. É importante frisar que não houve alteração nos dados de entrada de cada caso, com exceção dos cenários de vazões afluentes. Para cada revisão, foram feitas gerações de

cenários a partir de 10 sementes diferentes, com o intuito de se observar a variabilidade dos resultados, principalmente de CMO. A Figura 6.5 **Figura 6.5 – Evolução do CMO do primeiro estágio obtido pelo método tradicional e com a metodologia proposta.** apresenta a evolução do CMO do primeiro estágio para o subsistema Sudeste no período analisado, apenas para a semente 0. A linha vermelha representa os resultados obtidos com a metodologia tradicional e a azul obtidos com a metodologia proposta. As barras em verde referem-se às diferenças entre as duas curvas. Pode-se observar que, apesar de haver algumas pequenas diferenças entre as duas alternativas, não há alteração da trajetória das curvas.

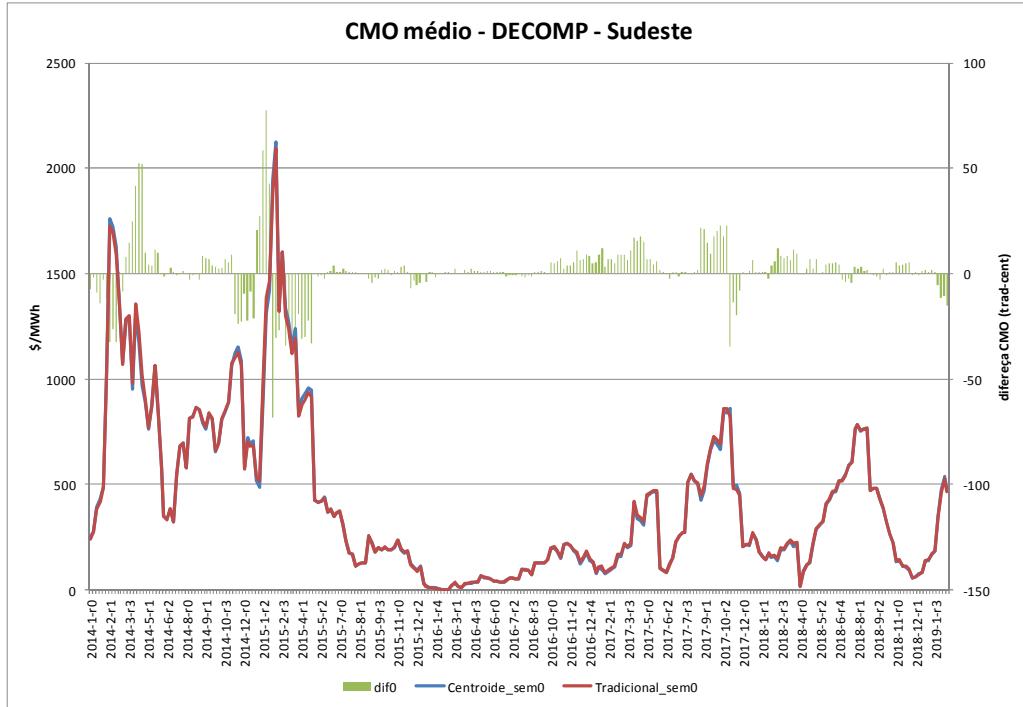


Figura 6.5 – Evolução do CMO do primeiro estágio obtido pelo método tradicional e com a metodologia proposta.

Na Figura 6.6 **Figura 6.6 – Coeficiente de variação do CMO das 10 sementes, calculado para todas as revisões, para o subsistema Sudeste.** é apresentado o coeficiente de variação do CMO das 10 sementes, calculado para todas as revisões, para o subsistema Sudeste. É possível observar que na maior parte dos casos o coeficiente de variação do CMO é menor nos casos com a metodologia proposta. Ou seja, alterando-se as sementes, os CMOs obtidos na metodologia proposta possuem uma menor variabilidade.

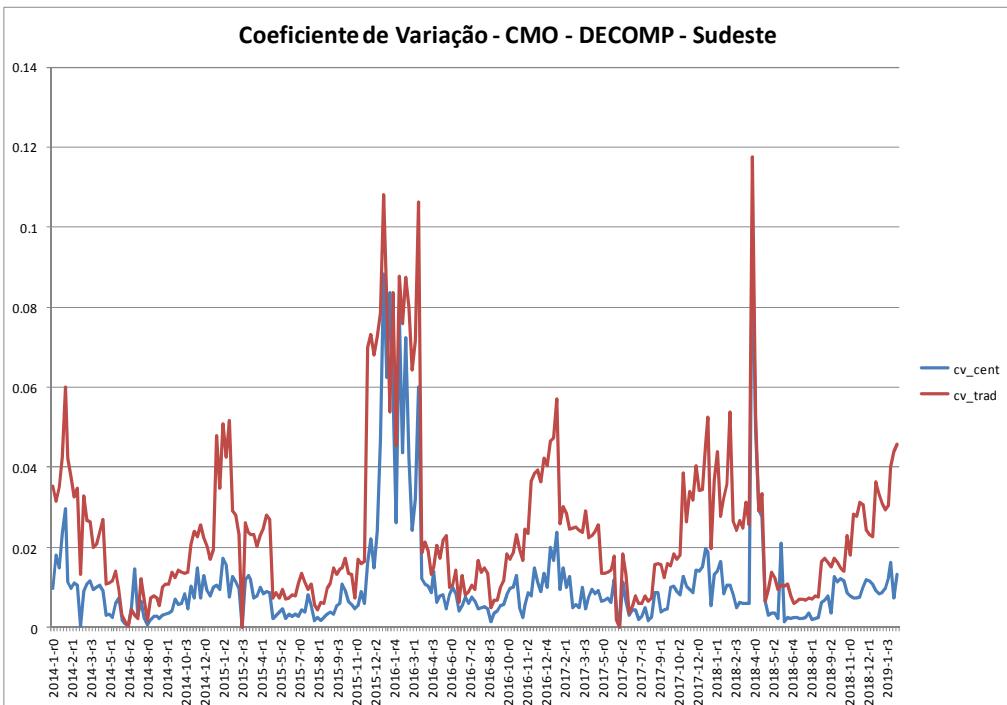


Figura 6.6 – Coeficiente de variação do CMO do primeiro estágio para os 10 conjuntos de cenários obtidos pelo método tradicional (linha em vermelho) e com a metodologia proposta (linha azul).

A partir da análise dos resultados obtidos durante os estudos do ciclo 2018/2019 do GT-Metodologia/CPAMP, pode-se observar que a consideração do centroide como representante do processo de agregação nos ruídos, em conjunto com o aumento do tamanho da amostra original, reduziu a variabilidade amostral e aumentou a qualidade dos cenários gerados de afluência para o horizonte de curto prazo. Ao contrário do que ocorre na agregação aplicada diretamente nos cenários de vazões, não há uma degradação da variabilidade dos cenários de afluências, pois esta é corrigida através de um fator de compensação. Também foi observada uma redução na variabilidade do CMO obtido pelo DECOMP quando se consideram árvores diferentes (sementes distintas), assim como se observa já havia sido observado nos resultados do modelo de planejamento de médio prazo, NEWAVE, que serão apresentados neste relatório.

6.2. Sensibilidades

6.2.1. PLD Fevereiro/2019_RV0

Para a execução do modelo DECOMP, é necessária a saída gerada pelo modelo GEVAZP denominada de VAZOES.RVX (onde X representa a semana operativa de execução do modelo). Nesse arquivo tem-se a informação da previsão de vazões que é utilizada pelo modelo DECOMP.

Dessa forma, com o propósito de se avaliar o impacto da implementação do uso do centroide no modelo GEVAZP, nesta, nessa seção são apresentados os resultados obtidos pelo modelo DECOMP utilizando o arquivo VAZOES.RVX gerado pelo GEVAZP oficial, e os resultados obtidos utilizando o arquivo VAZOES.RVX gerado pelo GEVAZP com centroide.

Para este fim, fez-se uma análise com relação ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) da primeira semana operativa (RVO) do mês de fevereiro de 2019. Nessa sensibilidade, foram consideradas 11 sementes diferentes para a etapa de geração de ruídos, tanto no modelo GEVAZP oficial quanto no modelo GEVAZP em que o uso do centroide foi incorporado. A FCF do modelo Newave é a do caso oficial, ou seja, não considera o aprimoramento da reamostragem e centroide, pois o objetivo do estudo é avaliar o impacto do uso do centroide incorporado no modelo GEVAZP usado pelo modelo DECOMP.

A seguir, a Figura 6.7 e a Figura 6.8 mostram o comportamento do PLD ao se variar as sementes, com o processo de agregação dos ruídos (opção com ou sem centroide) do GEVAZP para cada um dos submercados.

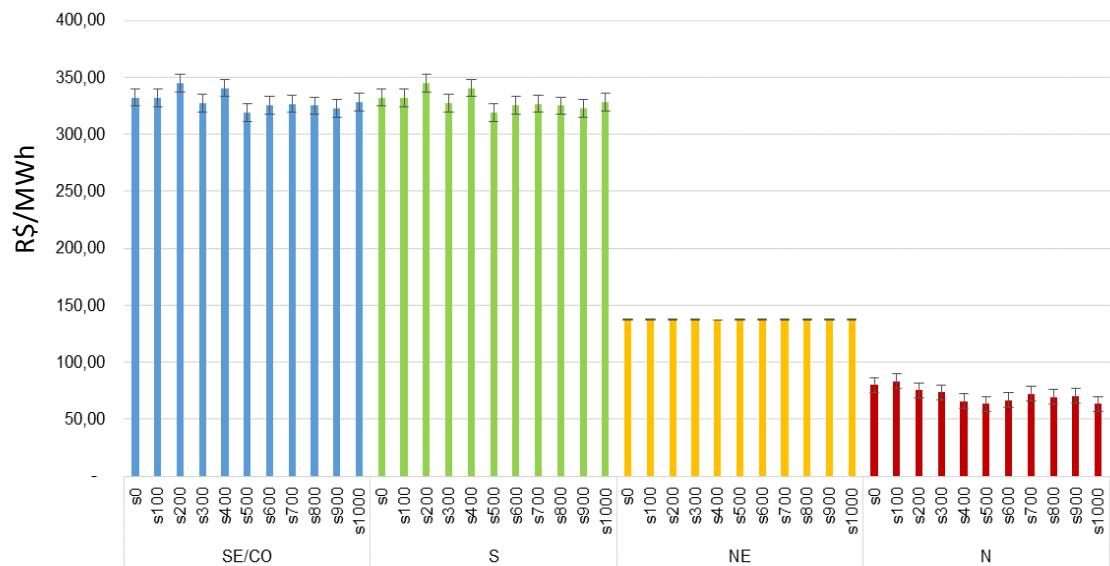


Figura 6.7 – PLD médio semanal por submercado (GEVAZP sem centroide) - Fevereiro/2019, Rev 0.

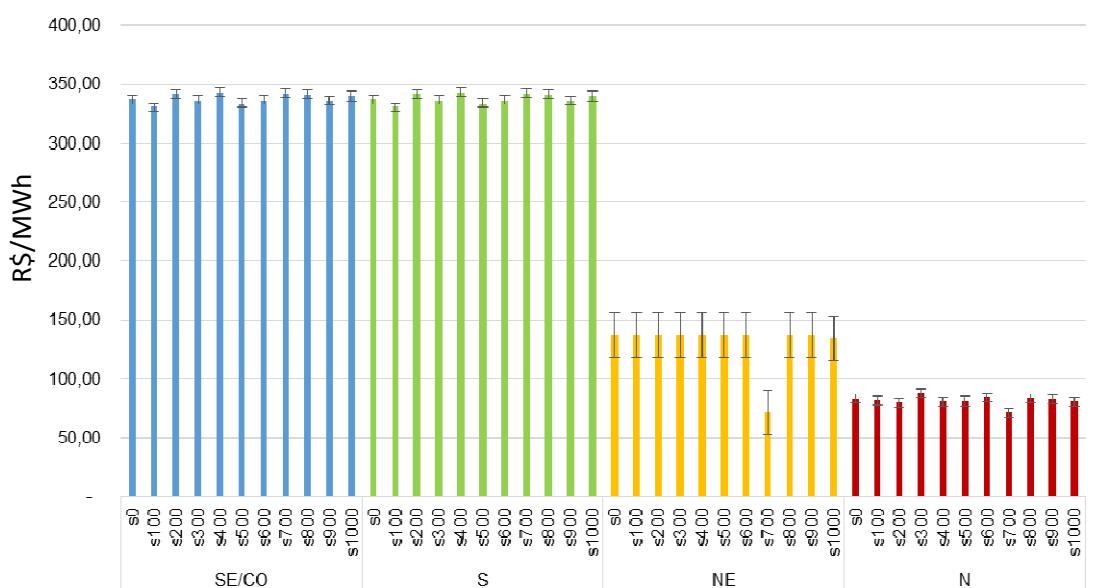


Figura 6.8 – PLD médio semanal por submercado (GEVAZP com centroide) - Fevereiro/2019, Rev 0.

Pela análise das figuras acima, conclui-se que a variabilidade do PLD, avaliada tanto pela altura das barras quanto pela magnitude das barras de erros, é maior quando o GEVAZP é executado

sem a opção de agregação dos ruídos, ou seja, sem o uso do centroide, para os submercados Sudeste/Centro-Oeste, Sul e Norte.

A fim de visualizar com mais detalhes o comportamento do PLD devido a aplicação do centroide, a Figura 6.9 mostra o valor do PLD agregado pela média das sementes para cada submercado e sensibilidade (com ou sem centroide). Adicionalmente, a Tabela 6.1 apresenta as estatísticas que decorreram da análise da Figura 6.9.

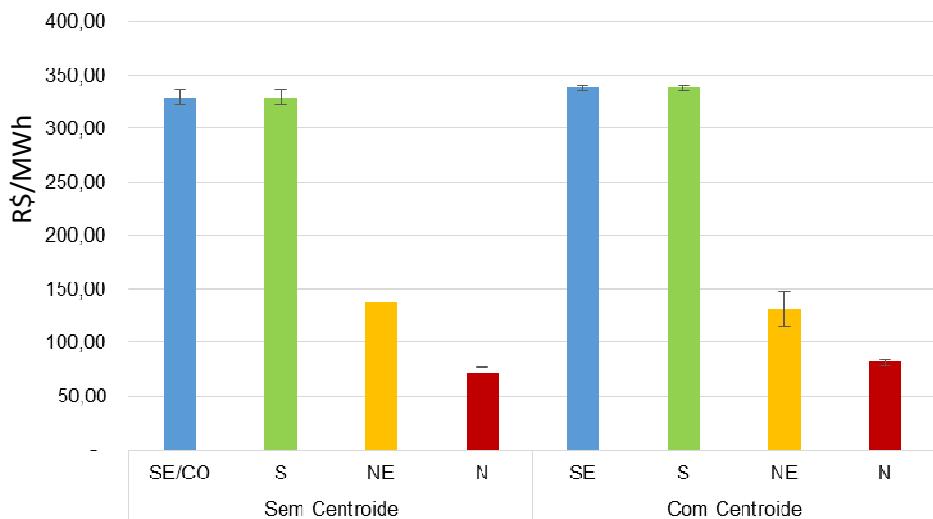


Figura 6.9 – PLD da média das sementes para cada submercado (GEVAZP com ou sem centroide).

Tabela 6.1 – Estatísticas do PLD.

Submercado	GEVAZP	Média	Desvio Padrão	Limite Inferior	Limite Superior	Erro médio
SE/CO	Sem Centroide	329,47	7,61	323,11	335,83	6,36
	Com Centroide	337,96	3,90	334,70	341,22	3,26
S	Sem Centroide	329,47	7,61	323,11	335,83	6,36
	Com Centroide	337,96	3,90	334,70	341,22	3,26
NE	Sem Centroide	137,47	0,21	137,29	137,64	0,17
	Com Centroide	131,18	19,79	114,63	147,72	16,54
N	Sem Centroide	71,32	6,49	65,90	76,75	5,43
	Com Centroide	81,47	4,02	78,11	84,83	3,36

O conjunto formado pela Figura 6.9 e pela Tabela 6.1 mostra que, na primeira semana operativa de fevereiro de 2019, considerando o valor médio dos valores de PLD obtidos com todas as sementes, a opção do centroide elevaria o valor do PLD em 3% nos submercados Sudeste e Sul e em 14% no submercado Norte. Já no submercado Nordeste apresentou uma redução de 5%.

No entanto, o desvio padrão dos casos com centroide nos submercados SE/CO, S e N é menor do que aquele obtido nos casos sem centroide. O mesmo comportamento, não é observado no submercado Nordeste.

6.2.2. PMO Outubro/2018_RV0

Foi realizado um teste alterando a ordem das usinas no modelo GEVAZP, com o objetivo de simular a consideração de sementes diferentes no processo de geração de cenários, utilizando como base o deck do ONS da primeira semana operativa (RV0) do mês de outubro de 2018. Nessa sensibilidade, foram considerados 5 ordenamentos diferentes para a etapa de geração das vazões, tanto no modelo GEVAZP 7 usado oficialmente quanto no modelo GEVAZP 7.1 em que o uso do centroide como representante do grupo foi incorporado, foi alterada a variável de agregação de vazões para ruídos e o número de vetores passou de 1.000 para 50.000.

A seguir, a Figura 6.10 e a Figura 6.11 mostram o comportamento do CMO ao se variar o ordenamento das usinas no processo de geração das vazões do GEVAZP para cada um dos submercados, não considerando (elemento mais próximo ao centroide) e considerando o uso do centroide como representante do grupo, respectivamente.

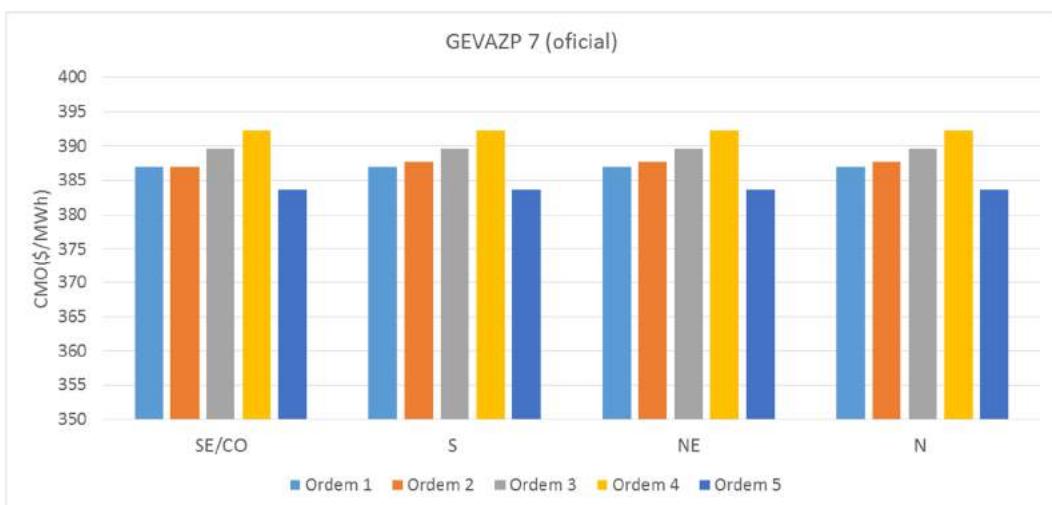


Figura 6.10 – CMO médio semanal por submercado (Resultados do DECOMP usando GEVAZP 7 sem considerar o centroide com representante do grupo) - Outubro/2018, Rev 0.

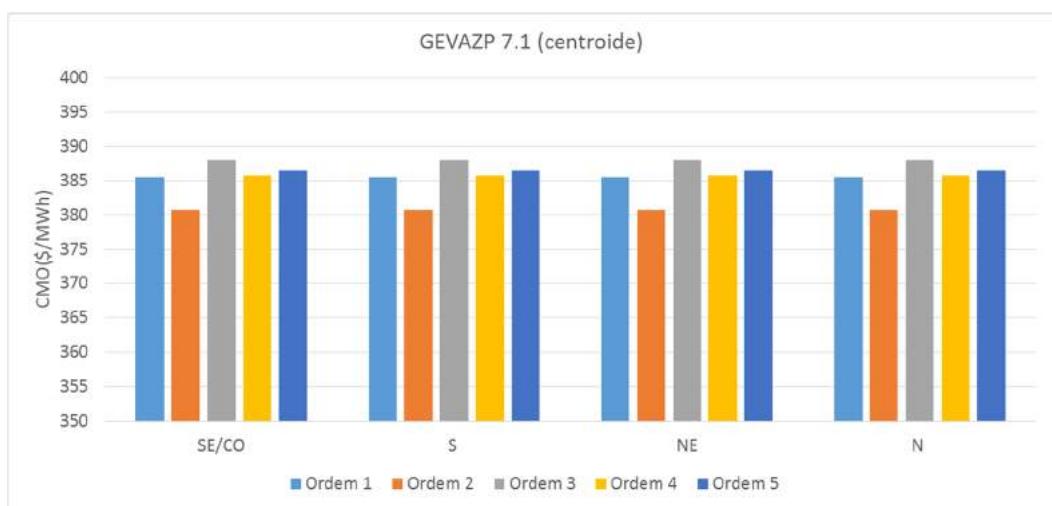


Figura 6.11 – CMO médio semanal por submercado (Resultados do DECOMP usando GEVAZP 7.1 considerando o centroide com representante do grupo) - Outubro/2018, Rev 0.

A Tabela 6.2 apresenta os desvios padrões para os dois casos, GEVAZP 7 (oficial) e GEVAZP 7.1 (centroide como representante do grupo).

Tabela 6.2 – Desvio Padrão.

Desvio Padrão		
Submercados	GEVAZP 7 (oficial)	GEVAZP 7.1 (centroide)
SE/CO	3,16	2,71
S	3,16	2,71
NE	3,16	2,71
N	3,16	2,71

Pela análise da Figura 6.10, da Figura 6.11 e da Tabela 6.2 conclui-se que, para o caso processado, a variabilidade do CMO é maior quando o GEVAZP é executado utilizando o elemento mais próximo sem a utilização do centroide como representante do grupo, para os submercados Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste Sul e Norte.

A seguir, pode-se verificar o valor do CMO médio das sementes para cada submercado e para cada sensibilidade (com ou sem centroide).

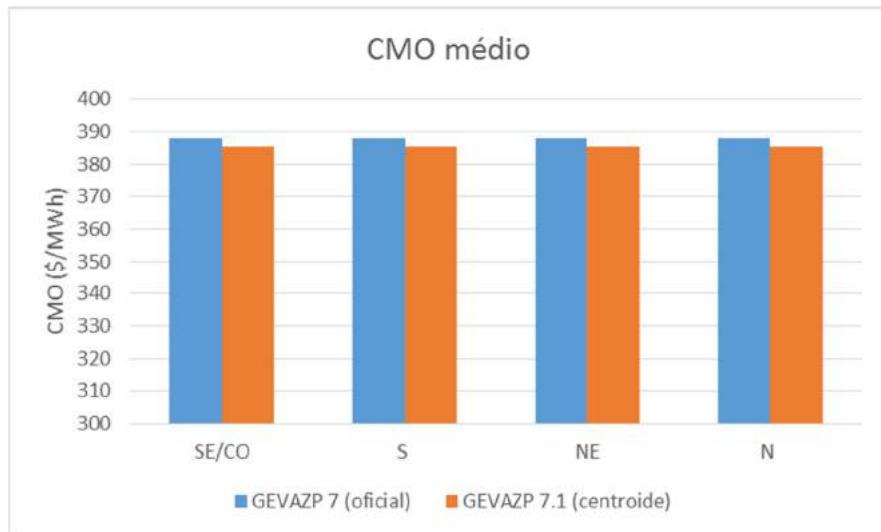


Figura 6.12 – CMO médio das sementes para cada submercado.

A Figura 6.12 mostra que na primeira semana operativa de outubro de 2018, considerando o valor médio dos CMOs obtidos pelo DECOMP ao usar com todos os cenários sintéticos variando o ordenamento das usinas, a opção do centroide reduziria o valor do CMO em aproximadamente 0.7% nos submercados Sudeste, Sul, Nordeste e Norte.

6.3. Conclusão

Como os resultados do uso do centroide no modelo GEVAZP se mostraram promissores, ou seja, houve redução do desvio padrão dos valores de CMO obtidos no DECOMP, o GT Metodologia indica seu uso para o ano de 2020, cuja aprovação depende da decisão plenária da CPAMP. Assim, o uso do centroide no GEVAZP foi encaminhado para validação na FT GEVAZP, iniciada ao final de maio de 2019.

7. Recomendações

O centroide, como representante no processo de Amostragem Seletiva (AS), resultou em uma redução na variabilidade amostral, em relação às variações da semente para a geração de cenários *backward*, observada nos resultados obtidos para o planejamento da operação, para o planejamento da expansão, em cálculos de garantia física e para a formação de preço. Além disso, observou-se redução do desvio padrão dos valores de CMO obtidos no DECOMP.

Os resultados apontaram para as seguintes conclusões: (i) ganhos relevantes na qualidade da função de custo futuro, quando se utilizam técnicas de reamostragem, devido ao aumento do número de cenários da árvore amostrada para a simulação *forward*, possibilitando uma melhor aproximação do limite inferior do valor esperado do custo de operação (ZINF) em direção ao valor ótimo teórico do problema; (ii) redução da variabilidade amostral, refletido tanto no ZINF quanto no valor esperado dos custos marginais de operação; (iii) o método de reamostragem plena passo 1 momento *forward* é o que produz a menor variabilidade amostral e as melhores estimativas em direção ao valor ótimo teórico do problema, apresentando ainda uma boa solução de compromisso na análise de trade-off entre os custos esperados de geração térmica e déficit; e (iv) o critério de parada do algoritmo de PDDE atualmente adotado no modelo NEWAVE continua adequado quando se utilizam as técnicas de reamostragem de cenários *forward* descritas neste trabalho.

Ao considerar o centroide como representante no processo de agregação dos ruídos observa-se redução na variabilidade dos cenários gerados para a recursão *backward*. Essa redução é ainda mais acentuada ao se considerar reamostragem da *forward*.

Das análises realizadas, observou-se que não há ganho em se aumentar o número de *backward*. Embora verifique-se ganho em aumentar o número de *forward*, este é pouco significativo e o tempo computacional adicional requerido não compensa. Portanto, o GT-Metodologia recomenda manter o número de *backward* em 20 e o número de *forward* em 200.

Portanto, em resumo, o GT Metodologia sinaliza que as seguintes propostas de avanços metodológicos sejam consideradas a partir da primeira semana operativa nos estudos de planejamento de operação e formação de preço, cuja aprovação depende da decisão plenária da CPAMP:

1. Consideração do método de reamostragem plena passo 1 momento *forward*, durante o cálculo da política operativa no modelo NEWAVE;
2. Consideração do centroide como representante no processo de Amostragem Seletiva (AS), em substituição ao ruído mais próximo ao centroide, para geração de cenários de energia natural afluente para os modelos NEWAVE e DECOMP;
3. Alteração da iteração mínima para 30, considerada no critério de parada do modelo NEWAVE.

Adicionalmente, recomenda-se avaliar a pertinência de se aprofundar, no próximo ciclo de trabalho da CPAMP, na análise da consideração do número de *backward* variável ao longo dos meses no período de planejamento.

Recomenda-se, por fim, que o limite máximo de iterações do processo de convergência, hoje definido em 45, seja reavaliado diante de aprimoramentos de hardware e de metodologias que aumentem a eficiência computacional, contribuindo assim para a redução do tempo de simulação.

8. Referências

- [1] D.D.J. Penna, M.E.P. Maceira, J.M. Damázio, F.Treistman, H.S. Araújo, A.C.G. Melo, "Análise da inflexão do custo marginal de operação no modelo NEWAVE entre os quarto e quinto estágios temporais ao se adotar a representação de 12 REEs para Sistema Interligado Nacional", Relatório Técnico CEPEL no 10783/2018, Setembro de 2018.
- [2] 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, Scotland, 2008.
- [3] M.E.P. Maceira, D.D.J. Penna, A.L. Diniz, R.J. Pinto, A.C.G. Melo, C.V. Vasconcellos, C.B. Cruz, "Twenty years of application of stochastic dual dynamic Programming in official and agent studies in Brazil – Main features and improvements on the NEWAVE model", 20th PSCC – Power Systems Computation Conference, Ireland, 2018.
- [4] D.D.J. Penna, F.Treistman, M.E.P. Maceira, "Avaliação de alternativas para escolha do representante no processo de agregação da Amostragem Seletiva", Relatório Técnico CEPEL no 13612/2018, Dezembro de 2018.
- [5] CEPEL (2016), Relatório Técnico 23950/2016, "Modelo de Geração de Séries Sintéticas de Energias e Vazões Manual de Referência". Rio de Janeiro
- [6] 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.
- [7] D.D.J. Penna, "Definição da árvore de cenários de afluências para o planejamento da operação energética de médio prazo", Tese de Doutorado, DEE, PUC-Rio, 2009.
- [8] F. Treistman, L.C.B. Santos, D.D.J. Penna, M.E.P. Maceira, H.S. Araújo, "Avaliação do uso do centróide no processo de agregação da Amostragem Seletiva na geração de cenários de afluências para o planejamento da operação de curto prazo.", Relatório Técnico CEPEL no 3383/2019, Maio de 2019.
- [9] A.L. Diniz, F.S. Costa, M.E.P. Maceira, T.N. Santos, L.C. Brandão, R.N. Cabral, "Short/Mid-Term Hydrothermal Dispatch and Spot Pricing for Large-Scale Systems - the Case of Brazil", 20th Power Systems Computation Conference, Dublin, Ireland, June 2018.
- [10] M.E.P. Maceira, D.D.J. Penna, C.B. Cruz , A.L. Diniz, A.C.G. Melo, F. Treistman, "Técnicas de Reamostragem de Cenários Hidrológicos para a simulação *forward* da PDDE na Definição da Estratégia de Operação Energética de Longo/Médio Prazos", Relatório Técnico Cepel 6606/2018, Junho 2018.
- [11] D.D.J. Penna, M.E.P. Maceira, A.L. Diniz, A.C.G. Melo, C.B. Cruz, "Avanços na Reamostragem de Cenários Hidrológicos Aplicada ao Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo", XIV SEPOPE, Recife – PE, 2018.
- [12] M.E.P. Maceira, C.B. Cruz, A.C.G. Melo, D.D.J. Penna, A.L. Diniz, F. Treistman, "Definição do Momento de Aplicação da Técnica de Reamostragem de Cenários Forward no Algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica e a Avaliação da Qualidade da Função de Custo Futuro", Relatório Técnico Cepel 3202/2019, Maio 2019.
- [13] A.B.Philpott, Z. Guan, "On the convergence of stochastic dual dynamic programming and related methods", Operations Research Letters, v.36, n.4, pp 450-455, 2008.
- [14] M.P. Soares, J.P. Costa, "On SDDP algorithm implementation - forward re-sampling, Technical Report, ONS, 2010.

[15] Caso Base para o LEN A-4/2018 está disponível em:
<http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/caso-base-do-leilao-de-energia-nova-a-4-2018-calcular-das-garantias-fisicas>. Acesso em: 04 de junho de 2019.

[16] PDE 2026 está disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2026>. Acesso em 04 de junho de 2019.

[17] Montgomery, Douglas C., and George C. Runger. Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons, 2010.

[18] Wonnacott, Thomas H., Wonnacott, Ronald J. Introductory statistics. 5^a Edição. John Wiley & Sons, 1990.

9. Apêndice

9.1. Teste t para o ZINF

Para calcular o intervalo de confiança da média do ZINF, μ , admite-se que o ZINF apresenta uma distribuição normal com média e desvio padrão desconhecidos. Considerando $nsem$ casos gerados ao mudar a semente utilizada na geração dos cenários, calcula-se a média \bar{x} e desvio padrão s amostrais. Ressalta-se que $nsem$ é pequeno, por isso utiliza-se a distribuição t com $nsem - 1$ graus de liberdade e valor crítico $t_{\frac{\alpha}{2}, nsem-1}$. Assim, o intervalo de confiança é calculado conforme a equações abaixo [17]:

$$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, nsem-1} s / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, nsem-1} s / \sqrt{n}$$

Onde:

$$\bar{x} = \sum_{isem=1}^{nsem} \frac{ZINF_{isem}}{nsem}$$

$$s = \sqrt{\sum_{isem=1}^{nsem} \frac{(\bar{x} - ZINF_{isem})^2}{nsem - 1}}$$

Ressalta-se que o estimador da média μ é a própria média amostral, \bar{x} , já o estimador do desvio padrão é s / \sqrt{n} , que serão apresentados neste capítulo para os respectivos casos.

9.2. Teste t para o CMO

A avaliação estatística adotada tem como objetivo verificar a média da variável aleatória sofre alteração significativa a medida que se realizam iterações adicionais do algoritmo PDDE, com o modelo Newave.

Neste contexto, o tipo de teste de hipótese necessário para auxiliar nesse problema, é aquele que se deseja obter a diferença entre duas médias obtidas de amostras independentes [18]. No caso específico em tela deseja-se testar a hipótese de que ambas as amostram possuem a mesma média, ou seja, a diferença entre as duas médias seja nula.

Desta forma, ao se desenvolver as fórmulas de teste de hipótese em questão, tem-se o seguinte:

$$H_0: \bar{CMO}_i = \bar{CMO}_{i+k}$$

Estatística de Teste:
$$t = \frac{\bar{CMO}_i - \bar{CMO}_{i+k}}{S_{CMO_i} S_{CMO_{i+k}} \sqrt{\frac{2}{n}}}$$

Sendo:
$$S_{CMO_i} S_{CMO_{i+k}} = \sqrt{\frac{S_{CMO_i}^2 + S_{CMO_{i+k}}^2}{2}}$$

Deseja verificar se a estatística de teste obtida pela expressão acima, encontra-se dentro do intervalo de confiança aceitável de uma distribuição *T-Student* para o nível de confiança desejável, em geral 95%.