

Título:

Avaliação dos resultados do modelo NEWAVE com a inclusão da usina Canastra no PMO preliminar de junho de 2025

Nº de páginas: 67

Área emissora:

Departamento de Sistemas Eletroenergéticos - DSE

Dados do cliente:

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS
Rua Júlio do Carmo, 251 – Cidade Nova - Rio de Janeiro – RJ, CEP: 20211-160

Responsável:

Sra. Tatiana Frade Gonçalves Mundstock
Email: tatiana@ons.org.br

Autores:

Cristiane Barboza da Cruz
Oliveira
André Luiz Diniz Souto Lima
Robério da Rocha Barboza
Renata Pedrini

Palavras-chave:

Planejamento da operação de longo/médio prazo;
programação dinâmica dual estocástica; variação amostral

Classificação de acesso:

☒ Público ☐ Interno ☐ Setorial ☐ Confidencial

Responsável pela Nota Técnica:

André Luiz Diniz Souto Lima

Tel.: (21) 2598-6046

E-mail: diniz@cepel.br

SUMÁRIO EXECUTIVO

Motivação: Este documento apresenta uma análise da variação dos resultados encontrada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) no Programa Mensal da Operação (PMO) de junho de 2025, no modelo NEWAVE, ao se incluir ou não a usina hidrelétrica (UHE) Canastra de forma explícita na configuração. A principal motivação foi verificar se havia alguma falha de implementação ou questão conceitual na modelagem da usina e, caso não fossem identificados problemas, entender as diferenças observadas nos resultados de custo marginal de operação (CMO) e limite inferior (ZINF) da solução ótima entre os casos com e sem a usina.

Metodologia: A análise compreendeu os seguintes passos: (i) avaliação da modelagem das características físicas da UHE Canastra, em particular a função de produção hidrelétrica, e os cenários de afluência gerados para essa usina, para identificar algum comportamento não usual ou anômalo; (ii) uniformização da quantidade de iterações para parada dos dois casos, para verificar se as diferenças eram provenientes de graus de “maturidade” distintos entre as funções de custo futuro obtidas para os dois casos; (iii) análise de sensibilidade do comportamento dos casos com os parâmetros da estratégia de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) utilizada para resolver o problema, em particular: quantidade de cenários backward, número de cenários forward por iteração e número máximo de iterações da PDDE; (iv) verificação dos resultados variando a semente utilizada para geração dos cenários e, na sequência, comparação entre os resultados obtidos com a modelagem individualizada e a reservatórios equivalentes de energia (REE).

Resultados: As conclusões obtidas nas primeiras análises foram as seguintes: (1) Não foram encontradas falhas na modelagem ou nos dados de entrada da usina UHE Canastra que pudessem ter causado a questão verificada no PMO de Junho. (2) As diferenças entre os casos Com e Sem a UHE Canastra reduziram ao se uniformizar a quantidade de iterações, mas não em um montante que fosse esperado, dada a pequena variação entre as configurações dos dois casos. (3) Os resultados dos casos se aproximam ao se aumentar os parâmetros da PDDE (número de cenários backward, cenários forward e quantidade de iterações), porém as diferenças continuam acima do esperado.

Na sequência, verificou-se que o motivo maior das diferenças é a variação amostral, que ocorre de forma implícita quando se inclui a UHE Canastra na modelagem individualizada. Esta conclusão foi corroborada por dois tipos de análises: (i) avaliação dos resultados ao se variar a semente, onde se verificou que as diferenças entre os casos que apresentam a mesma configuração (ou seja, ambos os casos com a UHE Canastra ou ambos os casos sem a UHE Canastra) são maiores do que as diferenças para a mesma semente incluindo ou não a UHE Canastra na configuração; (ii) comparação entre os resultados com e sem a UHE Canastra, porém removendo a mudança explícita da semente, onde se verificou que os resultados com e sem a UHE Canastra ficaram muito próximos. Finalmente, verificou-se que a variação amostral ao se alterar a semente já ocorria com a modelagem a REE, vigente oficialmente até o Dezembro/24.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

Com base nessas análises, foi desenvolvida e disponibilizada a versão 31_centos que elimina a mudança implícita das sementes ao se inserir/remover usinas hidrelétricas na configuração hidráulica individualizada.

De forma a mitigar o efeito da variação amostral propõem-se estudos mais aprofundados e aprimoramentos no modelo NEWAVE, como: avaliação do aumento dos parâmetros da PDDE que seja factível de ser incorporado no futuro próximo, para tornar os resultados do NEWAVE mais robustos, sem aumento relevante no tempo computacional; avaliação da estratégia de amostragem seletiva para agregação de cenários no NEWAVE, para torná-la mais robusta à semente utilizada. Aprimoramentos na própria estratégia de PDDE, como por exemplo a aplicação de reamostragem dos cenários backward, de forma a tornar os resultados mais robustos em relação aos cenários que são construídos.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
1.1 Descrição do problema ocorrido no caso da UHE Canastra pelo ONS	6
2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CEPEL	9
3. ANÁLISE DA MODELAGEM DA UHE CANASTRA	10
3.1 Modelagem da Função de Produção Hidrelétrica	10
3.2 Cenários de afluência gerados	11
3.3 Considerações	12
4. RESULTADOS COM UNIFORMIZAÇÃO DA PARADA DO ALGORITMO DE PDDE	13
5. ANÁLISES DOS CENÁRIOS GERADOS COM E SEM A UHE CANASTRA	15
6. COMPORTAMENTO DOS CASOS AO VARIAR OS PARÂMETROS DA PDDE	18
6.1 Aumento no número de cenários (aberturas) backward	18
6.2 Aumento quantidade de cenários (caminhos) forward por iteração	20
6.3 Aumento simultâneo da quantidade de aberturas backward e cenários forward	22
6.4 Aumento no número de iterações da PDDE	24
6.5 Considerações	25
6.6 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CASOS EM RELAÇÃO À SEMENTE	26
6.7 Variabilidade dos cenários e resultados do modelo NEWAVE com variação de sementes na modelagem híbrida	27
6.8 Variabilidade dos resultados com a semente na modelagem por REE	31
6.9 Variação dos parâmetros para representação do problema e da PDDE	34
6.9.1 Aumento no número de cenários (aberturas) backward	35
6.9.2 Aumento no número de iterações da PDDE	36
6.10 Novas Eficientizações para Resolução do Problema	38
6.11 Variação dos parâmetros do critério de aversão ao risco (CVaR)	40
6.11.1 CVaR $\alpha = 25\%$ e $\lambda = 35\%$ na modelagem híbrida	40
6.11.2 Neutro a risco na modelagem híbrida	41
6.11.3 CVaR $\alpha = 25\%$ e $\lambda = 35\%$ na modelagem por REE	42
6.11.4 Neutro a risco na modelagem por REE	43

Cliente: ONS

6.12	Resultados Com e Sem a UHE Canastra removendo o efeito de mudança nos cenários	44
6.13	Solução conjuntural para impedir a variação amostral nas mudanças de configuração da modelagem individualizada	46
6.14	Considerações	52
6.15	SOLUÇÃO ESTRUTURAL: REAMOSTRAGEM DOS CENÁRIOS BACKWARD	53
6.16	Procedimento proposto	53
6.17	Exemplo ilustrativo de resultados para um sistema hidrotérmico em cascata	54
6.17.1	Experimento 1- Comparação entre 2,4 e 6 cenários backward (com e sem reamostragem da backward)	54
6.17.2	Experimento 2 - Avaliação ampliada: ZINF, COPER e tempo de processamento	57

7. CONCLUSÕES 60

7.1	Propostas para tratar a variabilidade de resultados do NEWAVE	60
7.1.1	Versão do modelo NEWAVE com sementes fixas independente da entrada e saída de usinas hidrelétricas	61
7.1.2	Aplicação de funcionalidades já disponíveis no NEWAVE e seu potencial para viabilizar reparametrizações da PDDE	61
7.1.3	Aplicação da metodologia de reamostragem dos cenários backward	62
7.2	Investigações adicionais	62
7.2.1	Avaliação mais ampla dos efeitos da variação dos parâmetros para caracterização do problema e da estratégia de PDDE	62
7.2.2	Extensão da análise para o programa GEVAZP, que gera cenários para o DECOMP	63
7.2.3	Avaliação da estratégia de amostragem dos ruídos que compõe os cenários de afluências e velocidades de vento	63

BIBLIOGRAFIA 65

1. INTRODUÇÃO

No dia 28 de maio de 2025 o CEPEL recebeu um e-mail do ONS relatando um comportamento não esperado no modelo NEWAVE, reproduzido a seguir, onde os grifos foram realizados pelo CEPEL, para ressaltar as informações mais relevantes.

1.1 Descrição do problema ocorrido no caso da UHE Canastra pelo ONS¹

"Até o PMO MAI/25 a UHE Canastra era considerada com uma usina não simulada e sua geração prevista era contabilizada no bloco PEQUISI. Ficou decidido que partir de PMO JUN/25 ela seria representada explicitamente no CONFHD. Durante o PMO MAI/25 foi feita uma sensibilidade representando a UHE Canastra de forma não simulada e de forma explícita e os resultados observados naquela ocasião não foram significativamente diferentes. Infelizmente, não tenho este resultado para te enviar no momento.

Com este resultado em mente, foi elaborado o PMO JUN/25 preliminar com a usina representada de forma explícita. Como o foi observado um aumento significativo do CMO médio entre os PMOs de MAI/25 e JUN/25 preliminar, alguns agentes fizeram sensibilidades representando a usina novamente como não simulada e detectaram que o CMO deste caso de sensibilidade estava no mesmo nível do PMO MAI/25. A seguir, seguem os resultados do ONS/PEE considerando esta sensibilidade. Compare apenas as tabelas 1 e 3 (a tabela 2 foi uma sensibilidade alterando o posto da UHE e inserindo uma restrição de qturbmax).

PMO - JUNHO - 2025 - PRELIMINAR - NW V30.0.4

Custo Total de Operação	R\$ x 10 ⁶	Desvio Padrão
Valor Esperado Total	66,309.34	393.43
Custo de Geração Térmica	46,585.38	207.80
Custo de Déficit	0.00	0.00

CMOs médios anuais (R\$/MWh)					
Subsistema	2025	2026	2027	2028	2029
Sudeste	349.03	105.57	79.89	106.98	152.68
Sul	352.28	114.01	80.87	108.10	155.35
Nordeste	336.88	90.95	74.79	100.23	150.04
Norte	337.63	92.25	74.95	100.43	150.02

CMOs médios mensais (R\$/MWh)					
Subsistema	jan/25	fev/25	mar/25	abr/25	mai/25
Sudeste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sul	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nordeste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Norte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Subsistema	mai/25	jun/25	jul/25	ago/25
Sudeste	0.00	427.26	398.69	373.74
Sul	0.00	434.00	419.67	374.41
Nordeste	0.00	356.93	397.15	369.16
Norte	0.00	356.97	397.39	371.87

Subsistema	set/25	out/25	nov/25	dez/25
Sudeste	364.39	332.22	312.42	234.48
Sul	363.32	328.72	311.36	234.51
Nordeste	360.56	330.84	312.08	231.46
Norte	362.21	331.39	312.15	231.47

PMO - JUNHO - 2025 - PRELIMINAR COM CANASTRA 221 e QTURB - NW V30.0.4

Custo Total de Operação	R\$ x 10 ⁶	Desvio Padrão
Valor Esperado Total	66,725.31	393.04
Custo de Geração Térmica	46,936.92	208.02
Custo de Déficit	0.00	0.00

CMOs médios anuais (R\$/MWh)					
Subsistema	2025	2026	2027	2028	2029
Sudeste	356.96	103.76	80.69	108.10	151.14
Sul	360.22	112.30	81.66	109.26	153.64
Nordeste	344.03	91.01	75.75	100.94	148.63
Norte	344.75	92.35	75.94	101.22	148.62

CMOs médios mensais (R\$/MWh)					
Subsistema	jan/25	fev/25	mar/25	abr/25	mai/25
Sudeste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sul	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nordeste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Norte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Subsistema	mai/25	jun/25	jul/25	ago/25
Sudeste	0.00	440.22	407.71	382.45
Sul	0.00	445.73	429.32	383.29
Nordeste	0.00	366.64	406.24	377.60
Norte	0.00	366.65	406.42	380.11

Subsistema	set/25	out/25	nov/25	dez/25
Sudeste	374.47	340.87	318.61	234.37
Sul	373.36	337.59	317.89	234.35
Nordeste	370.28	339.20	317.98	230.30
Norte	371.95	339.79	318.05	230.30

PMO - JUNHO - 2025 - PRELIMINAR sem CANASTRA - NW V30.0.4

Custo Total de Operação	R\$ x 10 ⁶	Desvio Padrão
Valor Esperado Total	63,938.92	382.16
Custo de Geração Térmica	44,081.27	190.27
Custo de Déficit	0.00	0.00

CMOs médios anuais (R\$/MWh)					
Subsistema	2025	2026	2027	2028	2029
Sudeste	286.40	109.15	77.14	105.66	151.29
Sul	292.73	117.90	78.19	106.69	153.60
Nordeste	279.64	95.57	71.78	99.68	148.37
Norte	280.03	96.45	71.95	99.75	148.36

CMOs médios mensais (R\$/MWh)					
Subsistema	jan/25	fev/25	mar/25	abr/25	mai/25
Sudeste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sul	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nordeste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Norte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Subsistema	mai/25	jun/25	jul/25	ago/25
Sudeste	0.00	288.47	294.35	304.18
Sul	0.00	304.13	324.74	306.10
Nordeste	0.00	261.53	293.05	301.24
Norte	0.00	261.53	293.14	301.77

Subsistema	set/25	out/25	nov/25	dez/25
Sudeste	307.71	309.36	276.17	224.58
Sul	306.75	307.44	275.39	224.59
Nordeste	302.58	304.34	274.94	219.79
Norte	303.62	305.12	275.26	219.79

Fizemos algumas avaliações para ter certeza que não havia nada de errado com a UHE Canastra no momento da geração de cenários e representação da FPHa. Não identificamos problema algum.

¹ O trecho do ONS foi reproduzido mediante autorização, com o objetivo técnico de contextualizar a análise, sem implicar juízo de valor

Vale deixar registrado que encontramos detalhes no relatório *parpvaz.dat* e *parp.dat*, mas que não estão relacionados ao problema acima.

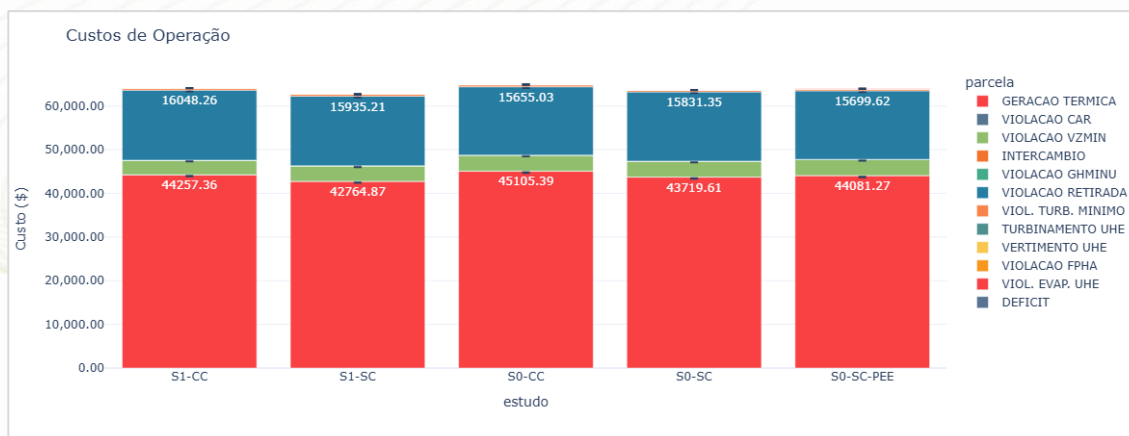
Nossa desconfiância principal é "variação amostral", dado que entrou uma nova usina e árvore de cenários backward foi alterada. Isso coincide com os resultados que você apresentou no HydroScheduling. Para verificar, rodamos 2 sensibilidades de semente (mexendo na ordem das usinas e rees), cujos resultados seguem abaixo. O caso semente 2 (S2) ainda está sendo processado, mas vou passar a evolução de ZINF que temos até o momento.

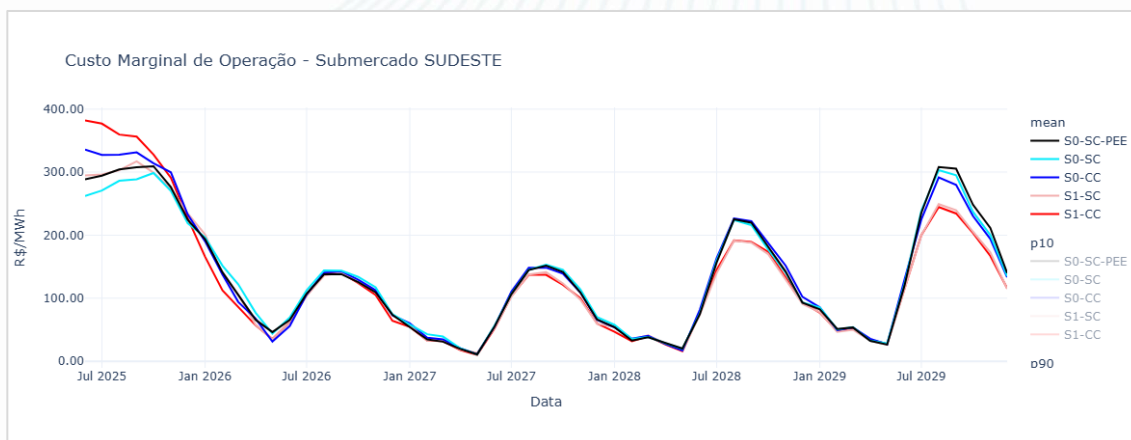
Os casos utilizados neste estudo de sensibilidade são ligeiramente diferentes do caso oficial com e sem Canastra. Para simplificar, consideramos o caso PMO JUN/25 preliminar (que tem a usina Canastra) e construímos o caso sem Canastra apenas retirando a usina do CONFHD. Não voltamos com a usina para o bloco de pequenas usinas.

A descrição dos casos é:

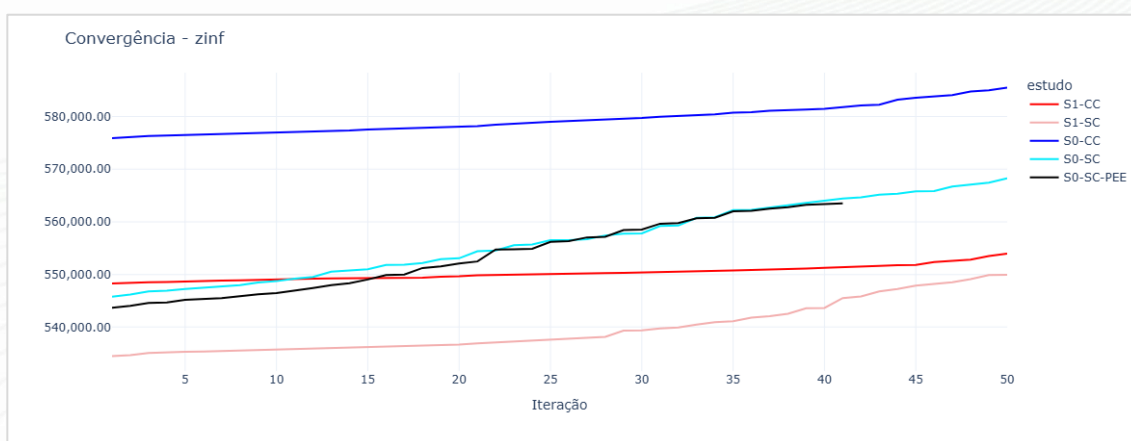
- S0-CC: PMO JUN/25 preliminar (caso publicado no Sintegre)
- S0-SC: igual ao caso S0-CC retirando UHE Canastra do arquivo CONFHD
- S0-SC-PEE: PMO JUN/25 preliminar, retirado UHE Canastra, mas representando-a de volta no bloco de pequenas usinas.
- S1-CC: igual ao caso S0-CC embaralhando as usinas e REEs
- S1-SC: igual ao caso S0-SC embaralhando as usinas e REEs

Todos os casos que rodados, exceto o S0-SC-PEE, foram feitos com número mínimo de iterações igual a 50.

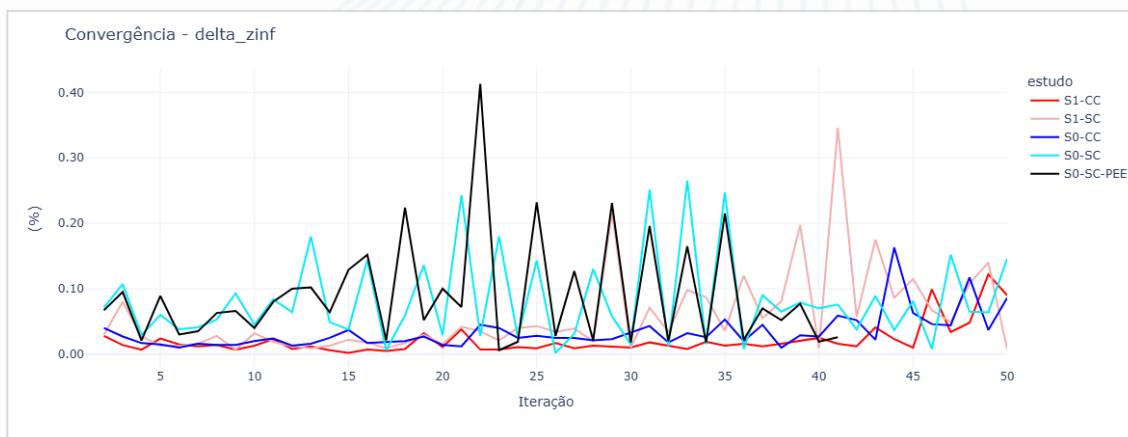




Observe que no caso com S1 os valores de ZINF se aproximam bastante, mas de toda forma o CMO médio fica bem diferente. Como a UHE Canastra é muito pequena e está sozinha na cascata, não imaginávamos uma mudança tão acentuada quanto a que estamos observando.



Algo que havia nos chamado a atenção era que o caso PMO JUN preliminar estava com delta de ZINF praticamente igual a zero desde as primeiras iterações, mas vimos que forçando mais iterações o delta de ZINF aparece, mostrando que ZINF está sendo aprimorado (aos poucos, mas subindo).



2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CEPEL

A princípio, o CEPEL corrobora o entendimento de que a mudança na forma de representação da UHE Canastra, incluindo-a como uma usina simulada de forma explícita, não deveria alterar sensivelmente os resultados. Nas próximas seções, serão apresentadas análises conceituais sobre os aspectos que, durante a investigação do caso, foram identificados como relacionados às variações encontradas, além de análises de sensibilidade específicas para esse caso em questão. Na sequência, denotaremos a seguinte nomenclatura para os casos:

- **caso “com UHE Canastra”:** a UHE Canastra é simulada de forma centralizada, ou seja, representada de forma explícita no deck de dados do NEWAVE. Corresponde ao caso do PMO preliminar de junho/2025, que não foi publicado;
- **caso “sem UHE Canastra”:** a geração da UHE Canastra é considerada no montante de geração de pequenas usinas, ou seja, a usina não é representada de forma explícita nos dados de entrada. Corresponde ao caso do PMO que foi publicado.

3. ANÁLISE DA MODELAGEM DA UHE CANASTRA

A UHE Canastra é uma usina a fio d'água no modelo NEWAVE, ou seja, sem reservatório de regularização. É importante esclarecer, inicialmente, que não há nenhuma particularidade, quando comparada com outras usinas a fio d'água, na representação da UHE Canastra como usina despachada de forma centralizada. De qualquer forma, assim como informado pelo ONS, o CEPEL também realizou análises da modelagem específica para essa usina, conforme relatado a seguir.

3.1 Modelagem da Função de Produção Hidrelétrica

A função de produção hidrelétrica aproximada (FPHA) é um modelo linear por partes construído para representar a variação da produtividade da usina com a altura de queda, a qual depende do volume armazenado, turbinamento e vertimento [1], [2]. Esta função é calculada previamente ao modelo de otimização, e incluída como restrições no problema de otimização.

Como a UHE Canastra é usina a fio d'água, a FPHA não depende do volume armazenado. Além disso, o cadastro da usina indica que não há vertimento influenciando a cota do canal de fuga. Portanto, a geração da usina é função apenas do turbinamento, e a FPHA é idêntica para todos os períodos, possuindo somente um corte (restrição), como mostrado na Figura 3.1.

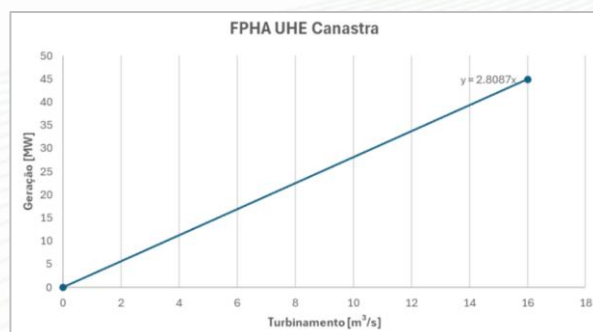


Figura 3.1 Gráfico da FPHA da UHE Canastra, para o primeiro período, considerando valores nulos de vertimento.

Observa-se que não há, em princípio, comportamento anômalo nesta função. Com o objetivo de verificar a acurácia da FPHA ao incorporá-la ao problema de otimização, comparam-se, no gráfico à esquerda da Figura 3.2, os valores de geração obtidos pelo NEWAVE com a geração obtida por consulta a FPHA, considerando o turbinamento obtido pelo modelo NEWAVE, na média dos 2000 cenários. Apesar de não ser possível identificar de forma exata no gráfico, afirma-se que, em todos os cenários, a geração ficou exatamente igual ao valor da FPHA². No gráfico à direita da mesma figura, mostra-se o montante de violação médio da FPHA ao longo dos 2000 cenários, onde não houve violações da FPHA³ em nenhum cenário.

² como a FPHA é modelada como uma inequação, em situações em que há necessidade de defluência e restrições associadas à geração da usina, pode ocorrer “descolamento” da geração com o valor da FPHA.

³ a violação é sinalizada pela ativação da variável de folga dessa restrição.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

Com base nesses resultados, não foi verificado um comportamento na geração da usina que trouxesse indícios de modelagem inadequada na sua função de produção.

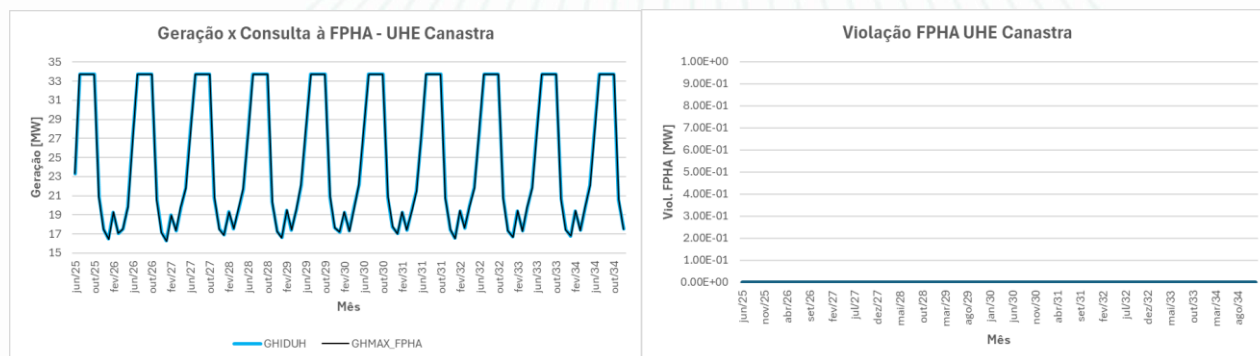


Figura 3.2 Comparação entre a geração obtida pelo modelo NEWAVE e a geração por consulta à FPHA (esquerda) e violações na FPHA (direita), na média dos 2000 cenários.

3.2 Cenários de afluência gerados

A afluência da UHE Canastra é modelada com base no modelo autorregressivo de afluência com componente anual (modelo PAR(p)-A) [3]], como as demais usinas, e incorporado no algoritmo de programação dinâmica dual estocástica (PDDE) [4] [5]. conforme a metodologia descrita em [6], [7]. Como a UHE Canastra não possui nenhuma usina a montante ou a jusante, a sua afluência tem pouco impacto na afluência das demais usinas. O histórico de afluência da UHE Canastra pode ser visto na Figura 3.3.

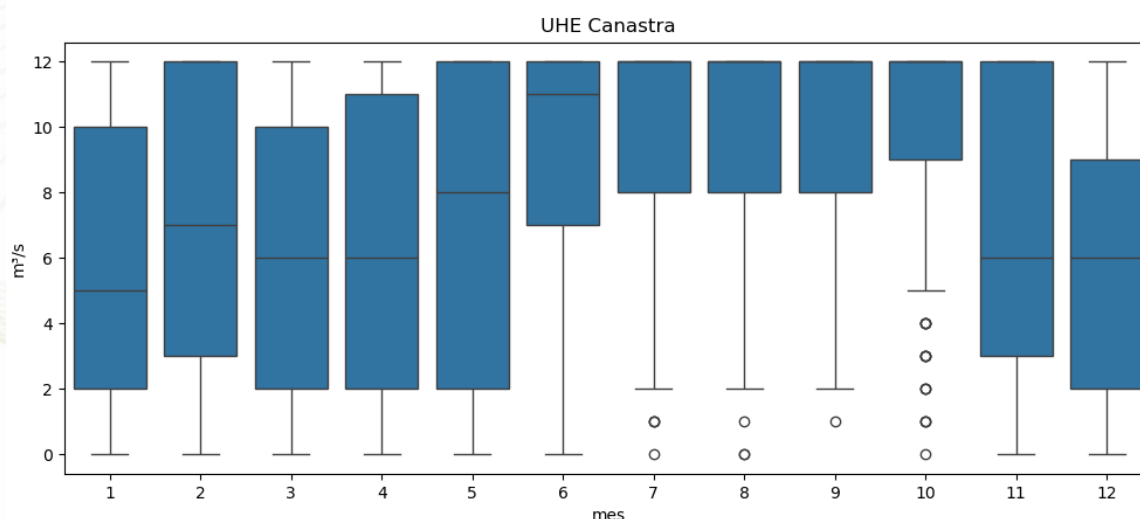


Figura 3.3 Histórico de afluência da UHE Canastra.

A UHE Canastra é uma usina especial [8]: nos meses de julho a outubro de 50% a 89,9% dos dados históricos correspondem a um valor constante. A Tabela 3.1 e Tabela 3.2 mostram as médias e desvio padrão das afluências da UHE Canastra para cada mês do ano nos 12 primeiros

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

meses do horizonte considerando tanto o histórico como as séries geradas para as etapas forward e backward da PDDE e para a simulação final, realizada após o cálculo da política.

Tabela 3.1 Média das vazões (m^3/s) da UHE Canastra nos cenários gerados.

mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
histórico	5.67	6.76	5.98	6.12	6.76	9.10	12.00	12.00	12.00	12.00	6.69	5.59
forward	6.14	7.21	6.30	6.46	7.29	8.36	12.00	12.00	12.00	12.00	7.63	6.44
backward	5.80	6.74	6.51	6.14	7.25	8.43	12.00	12.00	12.00	12.00	7.71	5.86
sim. final	5.96	7.07	6.18	6.35	7.20	8.36	12.00	12.00	12.00	12.00	7.62	6.31

Tabela 3.2 Desvio padrão (m^3/s) das vazões da UHE Canastra nos cenários gerados

mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
histórico	4.36	4.65	4.27	4.48	4.98	3.97	0.00	0.00	0.00	0.00	4.39	4.34
forward	4.22	4.68	4.23	4.22	4.62	3.42	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	4.05
backward	3.40	4.17	4.85	3.76	5.86	3.07	0.00	0.00	0.00	0.00	4.09	3.55
sim. final	4.06	4.76	4.22	4.19	4.50	3.12	0.00	0.00	0.00	0.00	4.12	4.00

As análises acima mostram que não são encontradas anormalidades na geração de cenários para essa usina.

3.3 Considerações

Com base nas análises deste capítulo, não se observa um comportamento anômalo na modelagem das características da UHE Canastra ou dos cenários de afluência gerados para essa usina. Com isso, **descarta-se, a princípio, a hipótese de que a questão verificada no PMO de junho esteja associada a alguma falha na modelagem ou dos dados de entrada para a usina.**

A ausência de problemas na modelagem da usina é reforçada na análise feita posteriormente na seção 6.6. Ao eliminar a variação amostral, responsável pelas discrepâncias observadas nos resultados originais, observa-se que os novos resultados do NEWAVE são virtualmente idênticos, independentemente de a UHE Canastra ser modelada ou não de forma explícita.

4. RESULTADOS COM UNIFORMIZAÇÃO DA PARADA DO ALGORITMO DE PDDE

Ao analisar os resultados de convergência do NEWAVE para os casos “com UHE Canastra” e “sem UHE Canastra”, verificou-se que os casos atingiram o critério de parada [9] referente à estabilização do limite inferior (ZINF) do valor ótimo do problema em quantidades diferentes de iterações do algoritmo de PDDE, como mostrado no primeiro gráfico da Figura 4.1. O segundo gráfico, por sua vez, ilustra a diferença entre os custos marginais de operação (CMOs) obtidos nos dois casos, considerando a média dos 2000 cenários da simulação final.

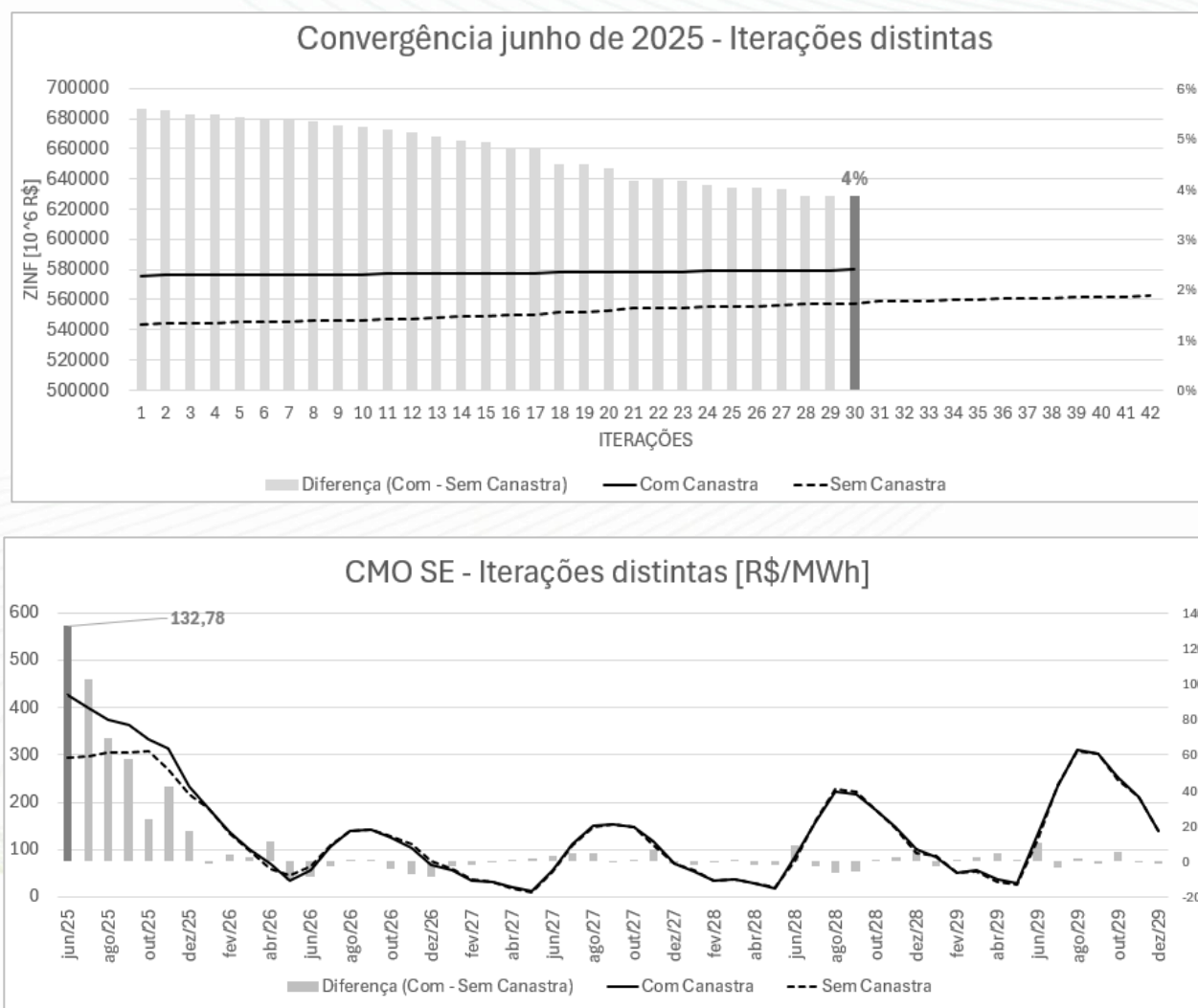


Figura 4.1 Evolução do ZINF nos casos Com e Sem a usina de Canastra (acima) e comparação entre os CMOs obtidos ao longo do horizonte de estudo, para os casos executados normalmente, com quantidade “livre” de iterações, onde atingiram a parada em números diferentes de iterações.

Recentemente, houve um caso em que se observou, também, uma sensibilidade além da esperada no modelo NEWAVE ao realizar uma modelagem alternativa para a geração térmica mínima de uma usina a GNL, que, a princípio, não deveria alterar sensivelmente os resultados [10]. Naquela ocasião, verificou-se que o motivo foi o modelo ter parado em quantidades diferentes de iterações, de uma rodada para outra. Portanto, para verificar se as diferenças observadas não teriam sido causadas pelo fato de a parada do algoritmo PDDE ter ocorrido em quantidades diferentes de iterações, foram executados os casos Com e Sem a usina de Canastra fixando o número de iterações em 50, cujos resultados são mostrados na Figura 4.2.

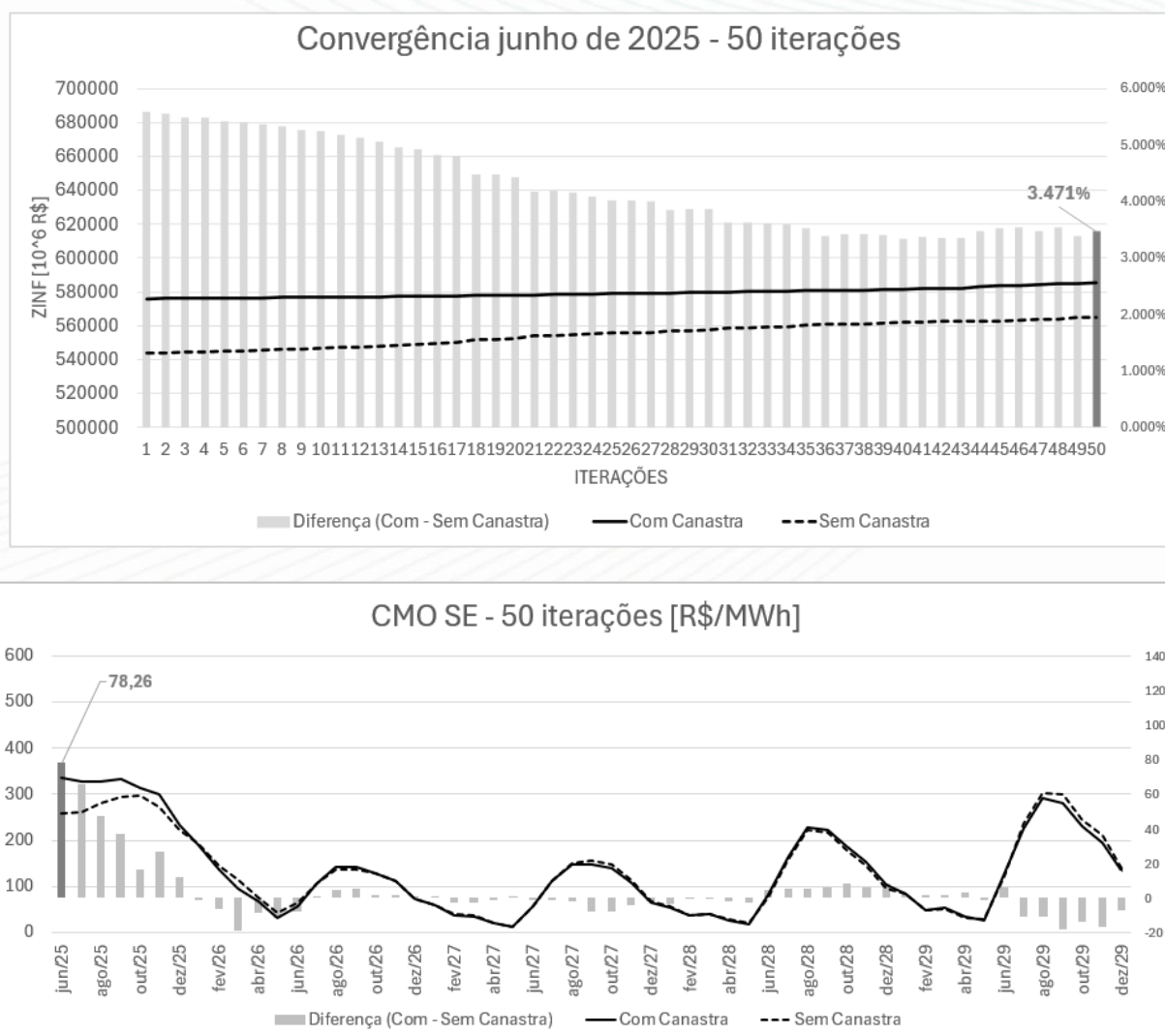


Figura 4.2 Evolução do ZINF nos casos Com e Sem a usina de Canastra (acima) e comparação entre os CMOs obtidos ao longo do horizonte de estudo, com ambos os casos executados com 50 iterações

Como se verifica, a diferença entre os CMOs dos dois casos reduziu quando eles foram executados com o mesmo número de iterações (50), quando já se atinge um grau de maturidade maior da política de operação de ambos os casos. Entretanto, ainda consideramos a diferença de CMOs entre os casos com 50 iterações (R\$78,26/MWh) excessiva para uma mudança tão pequena na configuração do estudo.

Por este motivo, prosseguiu-se com uma análise mais acurada da sensibilidade dos resultados dos casos em relação aos parâmetros da estratégia de PDDE, que é apresentada no capítulo a seguir.

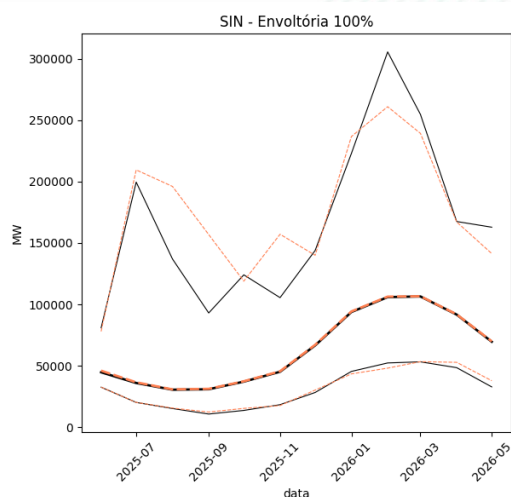
5. ANÁLISES DOS CENÁRIOS GERADOS COM E SEM A UHE CANASTRA

De forma a isolar a causa da variabilidade dos cenários com e sem a UHE Canastra é necessário avaliarmos a memória de cálculo do modelo autorregressivo periódico, utilizado para modelar a correlação temporal nas vazões das usinas hidrelétricas.

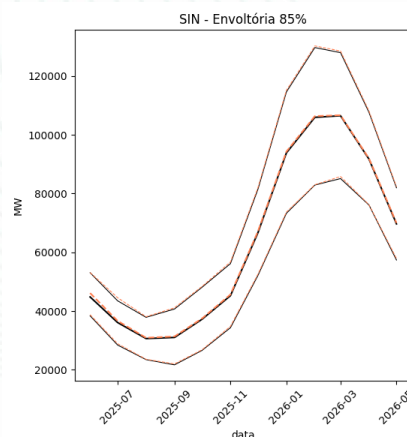
- **Coeficientes dos modelos autorregressivos:** Os coeficientes autorregressivos de cada usina não sofreram alteração com a inserção ou retirada da UHE Canastra. Ao analisar os coeficientes por REE, utilizados a partir do 12º mês operativo, houve alteração nos coeficientes dos modelos autorregressivos do REE Sul já que esse passa a incorporar também a UHE Canastra.
- **Correlação espacial:** A correlação espacial entre as usinas não foi alterada, principalmente porque a UHE Canastra não possui usina a jusante nem a montante. Quando analisamos a correlação espacial entre os REEs, observa-se que o REE Sul teve alteração em sua correlação espacial com os demais REEs. Apesar de a UHE Canastra não ter conexão com nenhuma outra usina, essa usina altera a correlação espacial do REE Sul, onde se situa.

Primeiramente, iremos focar na análise dos cenários sintéticos utilizados na otimização. A Figura 5.1 mostra as envoltórias de 100% e 85% dos 10mil cenários da etapa forward, considerando 50 iterações e 200 cenários amostrados a cada iteração.

Nota-se, pela Figura 5.1(a), enquanto a média dos cenários permanece inalterada, os extremos sofrem alterações. Apesar dos coeficientes do modelo autoregressivo não terem se alterado, houve uma variação expressiva na envoltória de 100% dos cenários. Por sua vez, a Figura 5.1(b) destaca que essa variabilidade é mais pronunciada nos 15% valores mais extremos dos cenários, já que na envoltória de 85% a variação é menos evidente. Além disso, destaca-se que as médias dos cenários com e sem a UHE Canastra são muito próximas, assim como os extremos inferiores dos cenários.



(a)



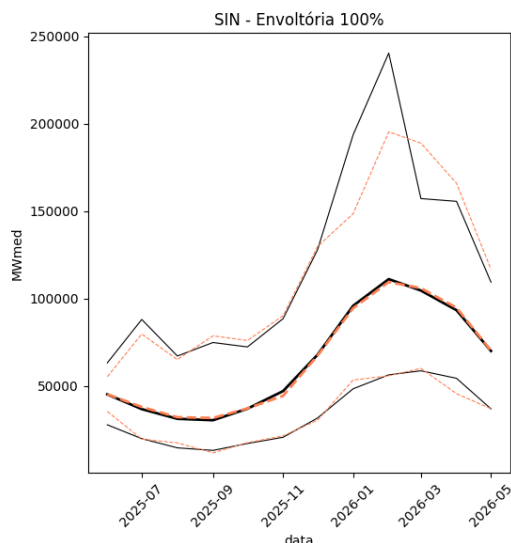
(b)

Figura 5.1 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa forward da otimização considerando 50 iterações e 200 cenários por iteração, totalizando 10mil cenários. O caso com Canastra é representado pela linha preta cheia e sem Canastra pela linha laranja pontilhada.

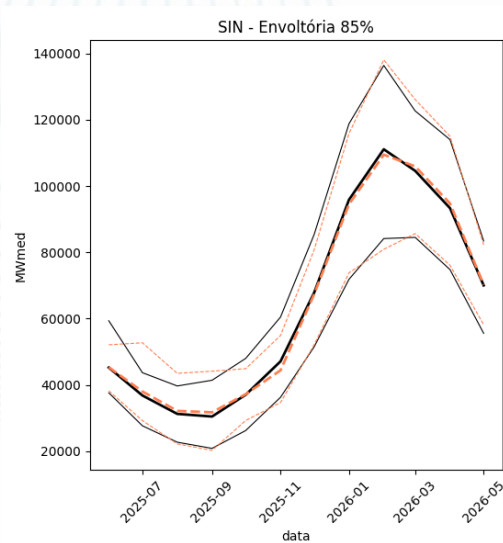
A Figura 5.2 mostra as envoltórias de 100% e 85% de 200mil cenários da etapa backward, considerando 50 iterações, 200 cenários amostrados a cada iteração e 20 realizações (aberturas) por estágio. Nos cenários backward, as variações das envoltórias de 85% e 100% são bastante evidentes. No entanto, assim como nos cenários forward, as médias dos cenários backward se mantém muito próximas com e sem a UHE Canastra. Nos cenários backward, porém, tanto o extremo inferior quanto o superior dos cenários apresentam bastante variação, sendo esta mais pronunciada no extremo superior.

Por fim, a Figura 5.3 mostra a envoltória com 100% dos cenários sintéticos da simulação final agregados no SIN.

Nota-se que, pela Figura 5.3(a), houve uma mudança significativa na envoltória superior ao considerar 100% dos cenários. No entanto, ao se analisar 85% dos cenários, as envoltórias com e sem a UHE de Canastra são bem parecidas.

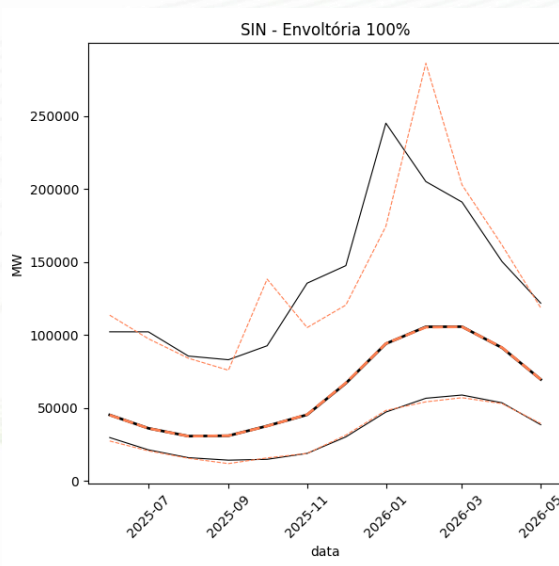


(a)

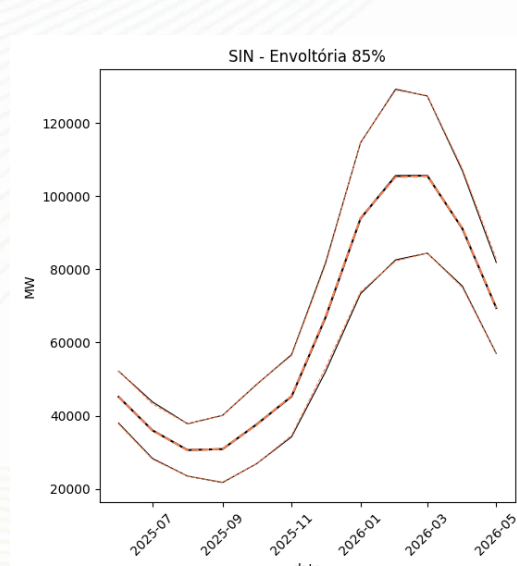


(b)

Figura 5.2 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 200 cenários por iteração e 20 realizações por estágio, totalizando 200mil cenários. O caso com Canastra corresponde à linha preta e sem Canastra à linha laranja.



(a)



(b)

Figura 5.3 Envoltória dos 2mil cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na simulação. O caso com Canastra corresponde à linha preta cheia e sem Canastra à linha laranja pontilhada.

6. COMPORTAMENTO DOS CASOS AO VARIAR OS PARÂMETROS DA PDDE

Uma possível razão para a diferença ainda observada (e não esperada) entre os casos “Com” e “Sem” a UHE Canastra, mesmo executando ambos os casos com 50 iterações, poderia ser o fato de a política de operação não estar suficientemente “madura” nos dois casos. Espera-se que, a princípio, os casos de NEWAVE com modelagem híbrida [11], [12] atinjam um grau de maturidade da função em uma quantidade de iterações superior à modelagem a REE, pelo fato de que a modelagem individualizada das usinas introduz uma dificuldade maior para se atingir a política ótima de operação.

6.1 Aumento no número de cenários (aberturas) backward

O número de cenários (aberturas) backward define o problema de otimização estocástica a ser resolvido, em relação ao conjunto total de cenários. Espera-se que, à medida que este valor aumente, o problema considerado pelo modelo esteja mais próximo do “real”, com distribuição de probabilidades contínua para as vazões às usinas hidrelétricas.

Primeiramente, iremos explorar as diferenças na geração de cenários com um número maior de aberturas (50). Apenas analisaremos os cenários da backward, já que a forward não é alterada pelo aumento no número de aberturas. A Figura 6.1 mostra a envoltória de 85% e 100% dos 500mil cenários sintéticos da backward obtidos nas primeiras 50 iterações do algoritmo.

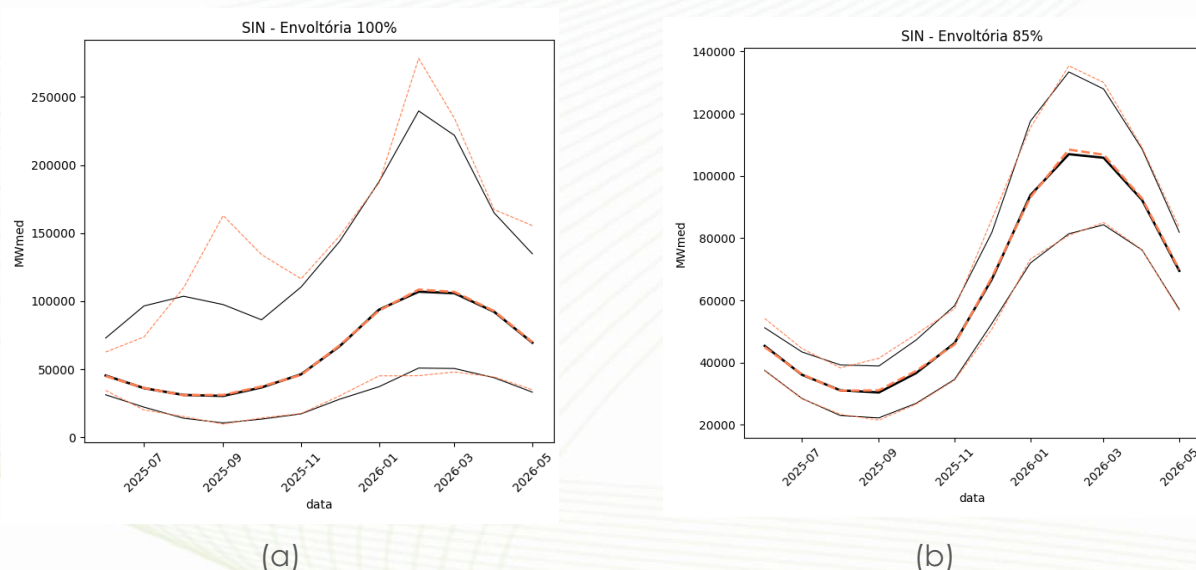


Figura 6.1 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 200 cenários por iteração e 50 realizações por estágio, totalizando 500mil.

Comparando-se os resultados das Figura 6.1 e Figura 5.2, nota-se que, ao utilizar 50 aberturas, as envoltórias de 85% dos casos com e sem Canastra ficam mais próximas, mas a envoltória de 100% ainda apresenta diferenças significativas ao se considerar ou não a usina de Canastra. Isso

mostra que, mesmo aumentando o número de aberturas, a inclusão da UHE Canastra influencia consideravelmente os cenários.

Os resultados da operação do sistema obtidos aumentando a quantidade de aberturas do valor oficial (20) para 50 são mostrados na Figura 6.2 e Figura 6.3.

Observa-se que, embora o aumento na quantidade de cenários backward de 20 para 50 tenha surtido efeito no sentido de aproximação entre o limite inferior (ZINF) dos casos Com e Sem a UHE Canastra, a diferença entre os CMOs dos dois casos, na média dos 2000 cenários da simulação final, continuou apresentando uma diferença muito acima do esperado, pela proximidade grande entre as configurações dos dois casos.

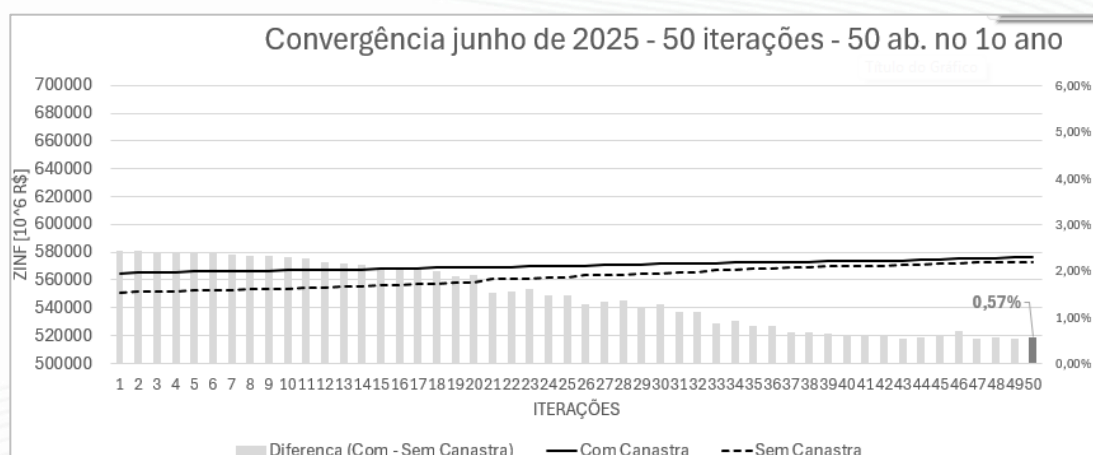


Figura 6.2 - Evolução do ZINF nos casos Com e Sem a usina de Canastra, com ambos os casos executados com 50 iterações e 50 aberturas backward.

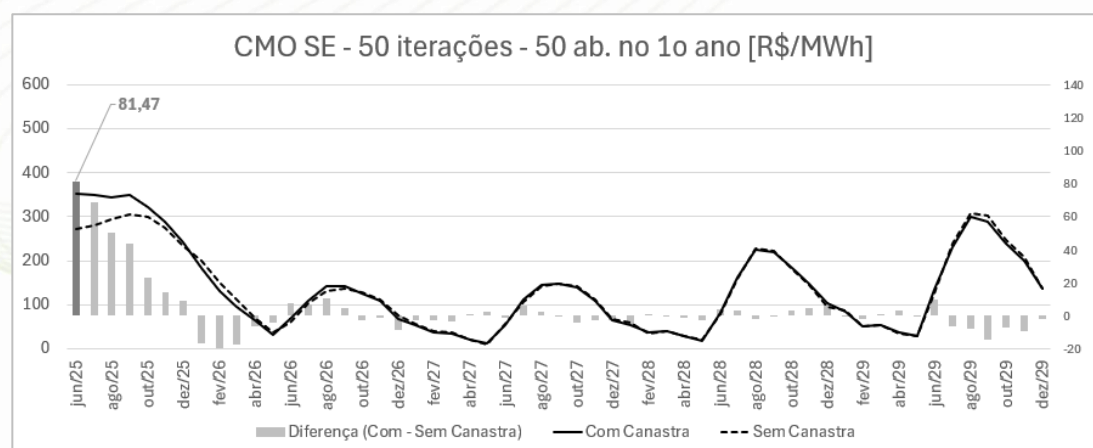


Figura 6.3 - Comparação entre os CMOs obtidos ao longo do horizonte de estudo (abaixo), com ambos os casos executados com 50 iterações e 50 aberturas backward.

6.2 Aumento quantidade de cenários (caminhos) forward por iteração

O número de cenários forward define o grau de exploração da árvore de cenários multi-estágio do problema estocástico resolvido pelo NEWAVE, a cada iteração da PDDE. Espera-se que, à medida que este valor aumente, a política de operação atinja maturidade mais rapidamente, ou seja, em menos iterações.

Primeiramente, iremos observar como ficam os cenários quando são consideradas 300 forwards por iteração. A Figura 6.4 mostra os cenários relacionados à etapa forward. Comparando os resultados com os da Figura 5.1, nota-se que a envoltória de 85% ficou muito mais próxima entre os casos ao considerar as 300 séries forwards. No entanto, pela Figura 6.4 (a), percebe-se que os extremos da distribuição ainda apresentam diferenças significativas.

Já nos cenários da backward a Figura 6.5 mostra que, ao utilizar 300 séries forwards, mas mantendo as 20 aberturas na backward, as envoltórias de 85% e 100% mantêm diferenças significativas ao considerar ou não a usina de Canastra.

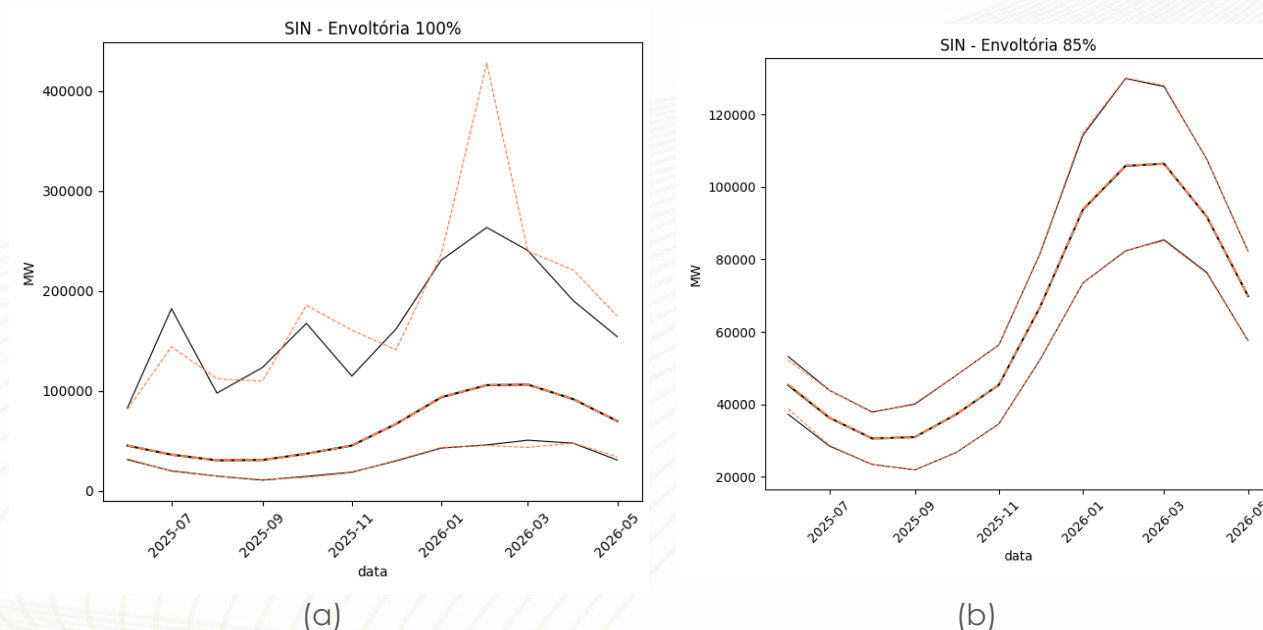


Figura 6.4 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa forward da otimização considerando 50 iterações e 300 cenários por iteração, totalizando 15mil cenários. O caso com Canastra é representado pela linha preta cheia e sem Canastra pela linha laranja pontilhada.

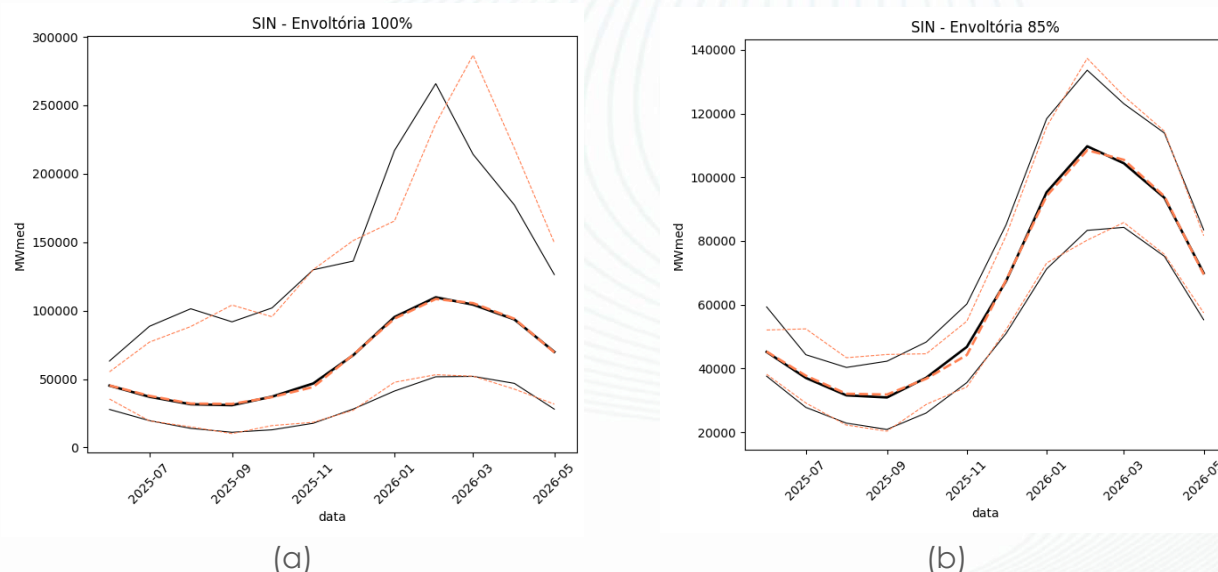


Figura 6.5 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 300 cenários por iteração e 20 realizações por estágio, totalizando 300mil. O caso com Canastra é representado pela linha preta cheia e sem Canastra pela linha laranja pontilhada.

Os resultados dos casos Com e Sem a UHE canastra aumentando o número de cenários forward do valor padrão (200) para 300 cenários são mostrados na Figura 6.6 e Figura 6.7.

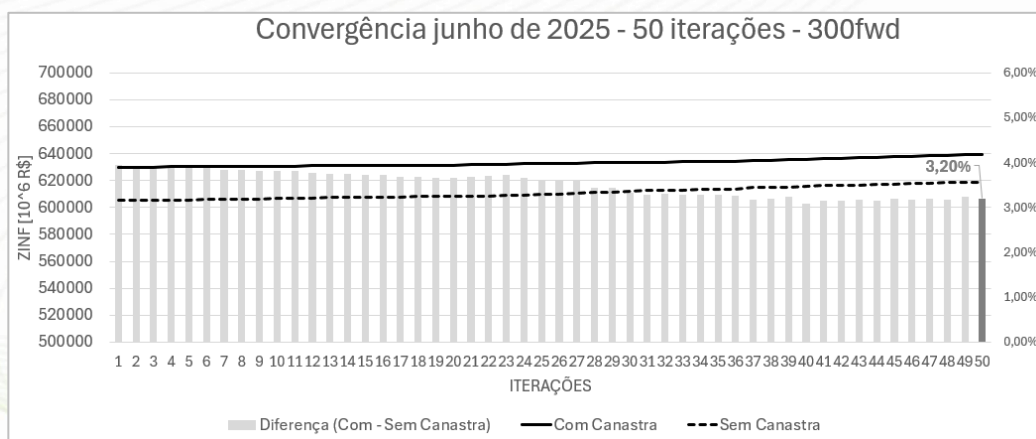


Figura 6.6 Evolução do ZINF nos casos Com e Sem a usina de Canastra, com ambos os casos executados com 50 iterações e 300 cenários forward.

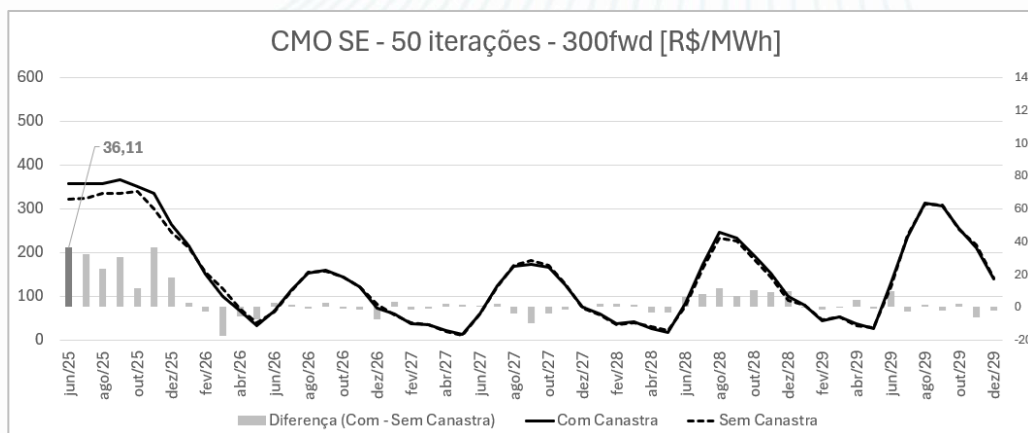


Figura 6.7 Comparação entre os CMOs obtidos ao longo do horizonte de estudo (abaixo), com ambos os casos executados com 50 iterações e 300 cenários forward.

Observa-se que não há uma aproximação tão grande entre os valores de ZINF nos dois casos. Entretanto, verifica-se um aumento mais significativo do valor de ZINF desde a primeira iteração, passando de cerca de 560.000 para 620.0000 ($\times 10^6$), o que é um indicativo da vantagem em aumentar a quantidade de cenários forward, em termos de avanço em busca do valor ótimo (Z^*) do problema. É importante ressaltar que o aumento na quantidade de cenários forward não muda o problema resolvido pelo NEWAVE. Portanto, o valor ótimo de Z^* (para o qual o valor de ZINF deve convergir assintoticamente) é o mesmo para os dois casos. Embora, a princípio, a diferença maior nos valores de ZINF entre os dois casos pudesse sugerir um “descolamento” entre os valores ótimos dos dois casos, os resultados obtidos com 100 iterações para o caso original (vide seção 6.4) trazem um maior conforto, pois verifica-se que, após 100 iterações, o caso com 200 cenários forward atinge valores de ZINF próximos de 600.000 (vide Figura 6.6), ou seja, aproximando-se dos valores obtidos com 300 cenários forward a cada iteração.

Finalmente, verificou-se ainda que, ao aumentar a quantidade de cenários forward visitados a cada iteração, há uma proximidade maior entre os CMOs dos dois casos, cuja diferença passou a ser de R\$36,11/MWh.

6.3 Aumento simultâneo da quantidade de aberturas backward e cenários forward

Nesta seção é explorado o efeito combinado do aumento de aberturas de 20 para 50 e de séries forwards de 200 para 300. A Figura 6.8 mostra a envoltória dos cenários da forward e a Figura 6.9 a envoltória dos cenários da backward. Como os cenários da forward não sofrem efeito do aumento do número de aberturas, nota-se que a Figura 6.8 e Figura 6.4 são iguais.

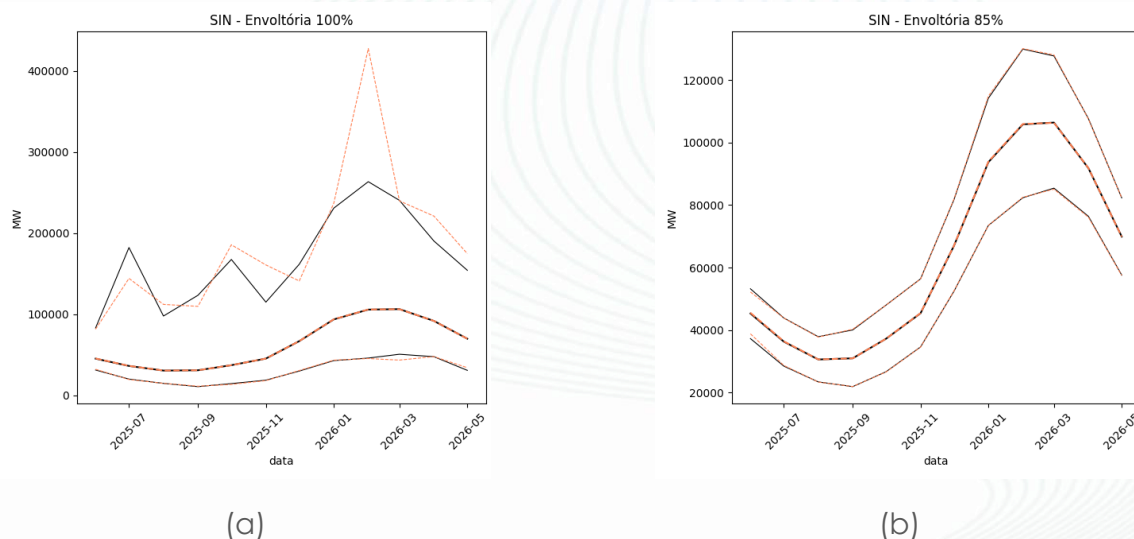


Figura 6.8 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa forward da otimização considerando 50 iterações e 300 cenários por iteração, totalizando 15mil cenários. O caso com Canastra é representado pela linha preta cheia e sem Canastra pela linha laranja pontilhada.

Já os cenários da backward sofrem mudanças significativas ao combinar os efeitos do aumento no número dos cenários forward e aberturas da backward. Ao compararmos a envoltória de 85% da Figura 6.9 com a Figura 5.2 percebe-se uma aproximação das envoltórias com e sem a UHE Canastra, um efeito semelhante ao obtido com o aumento do número de aberturas da observado na Figura 6.1. No entanto, da mesma forma como naquele caso, a envoltória de 100% ainda apresenta comportamento significativamente distinto.

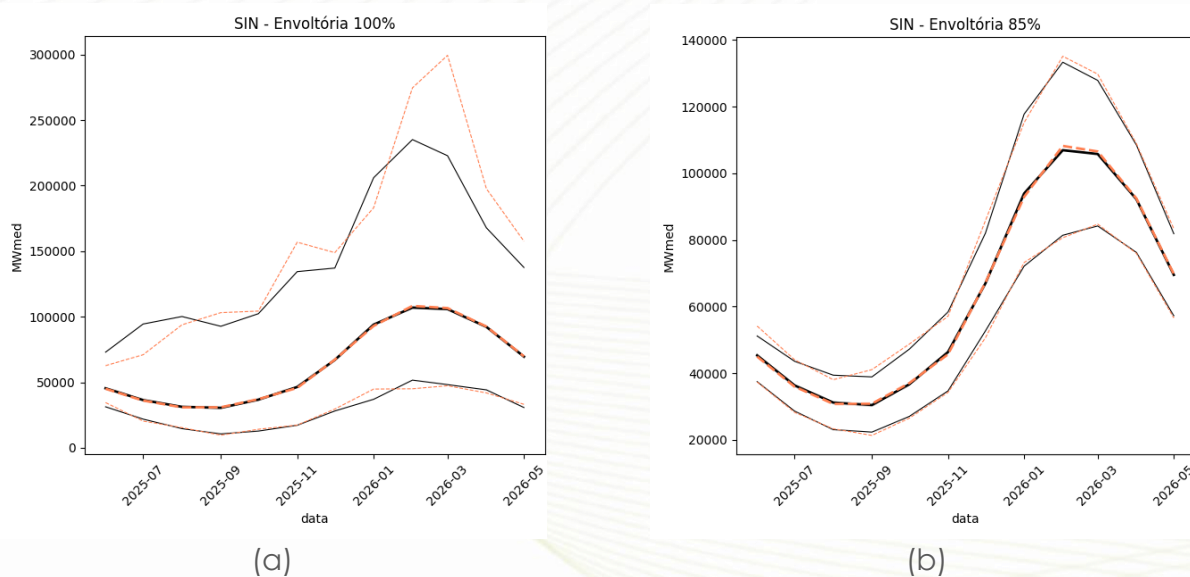


Figura 6.9 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 300 cenários por iteração e 50 realizações por estágio,

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

totalizando 750mil. O caso com Canastra é representado pela linha preta cheia e sem Canastra pela linha laranja pontilhada.

Na Figura 6.10 são explorados os efeitos de aumento no número de cenários forward e aberturas da backward na convergência do caso e no CMO do submercado Sudeste.

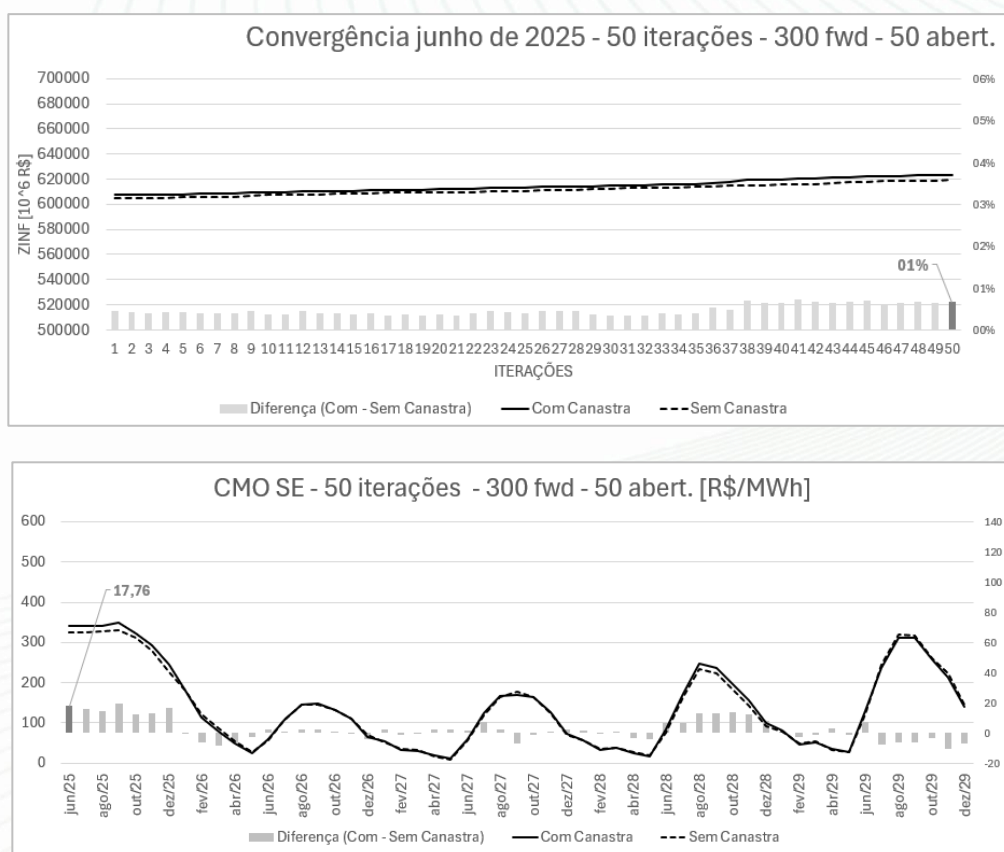


Figura 6.10 Evolução do ZINF nos casos Com e Sem a usina de Canastra (acima) e comparação entre os CMOs obtidos ao longo do horizonte de estudo (abaixo), com ambos os casos executados com 50 iterações, 50 aberturas backward e 300 cenários forward

Nota-se que o efeito conjugado do aumento dos dois parâmetros trouxe uma proximidade ainda maior entre os valores de ZINF e de CMO para os casos Com e Sem a UHE Canastra.

6.4 Aumento no número de iterações da PDDE

Um parâmetro importante para aumentar o grau de maturidade da política de operação do NEWAVE – assim como os resultados a ele associados – é aumentar o número de iterações da PDDE. A Figura 6.11 mostra os resultados obtidos aumentando-se o número de iterações de 50 para 100 e mantendo as demais parametrizações do caso original.

Embora ainda haja diferenças razoáveis no valor de ZINF, nota-se uma aproximação grande nos valores de CMO.

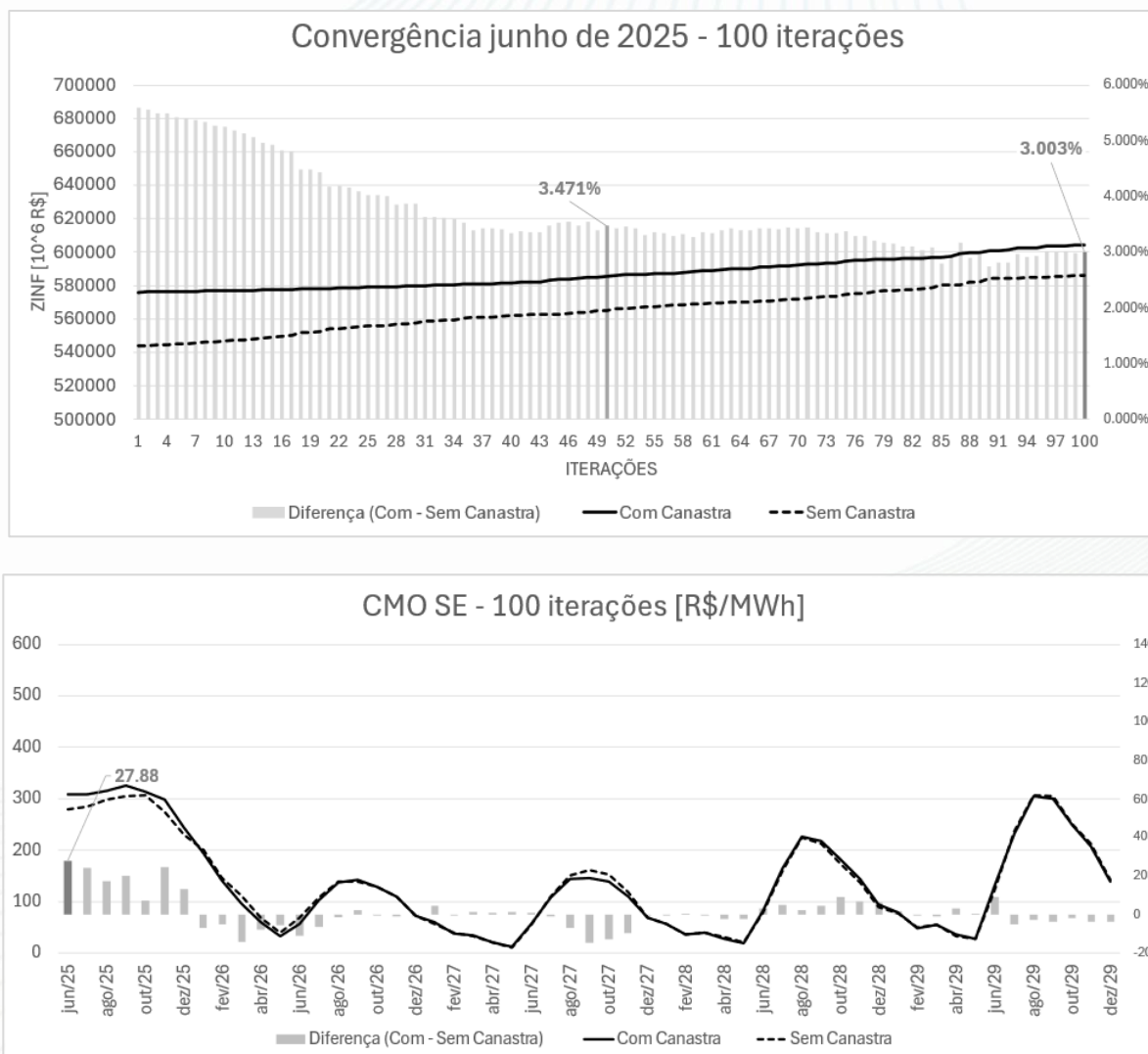


Figura 6.11 Evolução do ZINF nos casos Com e Sem a usina de Canastra (acima) e comparação entre os CMOs obtidos ao longo do horizonte de estudo, com ambos os casos executados com 100 iterações

6.5 Considerações

As análises dessa seção mostram que, ao considerar parâmetros da PDDE que garantem uma melhora na representação do problema (aumento no número de cenários backward) um maior grau de maturidade na política operativa (aumento no número de cenários forward e do número de iterações), os resultados dos casos Com a UHE Canastra e Sem a UHE Canastra se aproximam, apresentando um comportamento mais próximo do esperado.

De qualquer forma, mesmo para a política de operação obtida com os parâmetros originais do problema (20 cenários backward, 200 cenários forward e 50 iterações) não se esperaria uma diferença sensível entre os casos Com e Sem a UHE Canastra, dada a diferença muito pequena entre a configuração dos dois casos. Portanto, na busca de uma explicação para essa diferença,

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

avalia-se, na próxima seção, o comportamento do modelo NEWAVE ao variar a semente utilizada para geração dos cenários backward e forward do problema.

6.6 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CASOS EM RELAÇÃO À SEMENTE

Os cenários de afluência forward e backward produzidos pelo modelo NEWAVE são gerados de forma aleatória, a partir da distribuição de probabilidades das afluências às usinas hidrelétricas (nos períodos individualizados) ou nos reservatórios equivalentes de energia (REE), para os períodos em que se utiliza uma representação agregada. De forma a garantir a reprodutibilidade de resultados⁴ do modelo, deve-se fixar a semente utilizada para gerar os números aleatórios, com os quais são gerados os cenários.

Um aspecto importante, que deve ser observado, é que variações na configuração de usinas hidrelétricas ou de reservatórios equivalentes alteram os números aleatórios que são utilizados para sortear os cenários de afluência, nas seguintes situações:

- nos períodos a reservatórios equivalentes: quando se troca a ordem dos REEs, inclui ou remove um REE da configuração;
- nos períodos a usinas individualizadas: quando se troca a ordem das usinas, inclui ou remove uma usina hidrelétrica da configuração.

Percebe-se, portanto, um aspecto crucial para a análise desse caso: a inclusão da UHE Canastra na configuração causa uma mudança nos sorteios dos cenários de afluências para as usinas hidrelétricas, tanto em relação aos cenários backward quanto aos cenários forward que são visitados. Mais especificamente, a entrada de um novo “objeto” (usina hidrelétrica) na geração de cenários sintéticos afeta as sementes utilizadas na geração dos ruídos, que compõem as afluências geradas de forma individualizada, por usina.

Ressalta-se que, embora os cenários gerados entre os diferentes sorteios sejam equivalentes, do ponto de vista estatístico⁵, a mudança nesse sorteio pode causar uma variação razoável nos resultados. Esse efeito é o que se chama de “variação amostral”, mencionada no documento do ONS, reproduzido na seção 1.1.

Portanto, nesta seção estuda-se a variabilidade dos cenários quando se muda a semente, para os casos Com e Sem a UHE Canastra, considerando tanto a modelagem híbrida, que entrou oficialmente em vigor em janeiro de 2025 (seção 6.7), como a modelagem por REE (seção 6.8), que era utilizada até 2024.

⁴ reprodutibilidade significa que, em qualquer computador ou quantidade de processadores, o modelo NEWAVE deve produzir exatamente os mesmos resultados.

⁵ dada a limitação intrínseca de representatividade quanto ao número reduzido de cenários backward.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

6.7 Variabilidade dos cenários e resultados do modelo NEWAVE com variação de sementes na modelagem híbrida

De forma a avaliar a sensibilidade dos resultados ao se variar a semente utilizada para gerar os cenários, executou-se o modelo NEWAVE com diferentes sementes, para os casos Com e Sem a UHE Canastra⁶.

Primeiramente, a Figura 6.12 apresenta um gráfico em violino construído a partir das 20 aberturas da etapa backward do primeiro mês do NEWAVE, considerando a probabilidade associada a cada abertura, para 11 sementes diferentes de geração de números aleatórios. Um gráfico em violino é uma ferramenta de visualização estatística que combina a informação de um boxplot com uma estimativa suavizada da densidade da distribuição dos dados. Assim, ele mostra não apenas valores centrais e faixa de dispersão, mas também o formato completo da distribuição, incluindo assimetrias, multimodalidades e caudas mais espessas ou mais finas.

Ao analisarmos o primeiro mês, conseguimos isolar exclusivamente o efeito da variabilidade amostral. Isso ocorre porque o primeiro mês da backward possui uma característica especial em relação aos demais: a distribuição dos cenários tem as mesmas características que a distribuição dos ruídos. Como o histórico prévio é idêntico e a parcela determinística da afluência é a mesma para todas as aberturas, não há influência das decisões ou trajetórias da forward. Assim, toda a variabilidade observada no primeiro mês decorre unicamente dos ruídos amostrais.

Analisamos primeiramente os resultados considerando o caso Com a UHE Canastra. Nota-se uma diferença significativa nas distribuições entre as sementes. A distribuição original, em preto, apresenta uma cauda de valores críticos de afluência muito mais pronunciada que as outras sementes, enquanto a semente representada em verde claro apresenta uma cauda mais significativa para valores otimistas de afluência. É importante ressaltar que, como o gráfico se refere apenas ao primeiro período da backward, não se analisam as diferenças na operação resultante das políticas geradas por cada semente.

De forma a complementar à análise anterior, a Figura 6.13 mostra as envoltórias 100% e 85% dos 10mil cenários da etapa forward para todas as sementes mostradas na Figura 6.12, ao longo de todo o primeiro ano do estudo, considerando 50 iterações e 200 cenários amostrados por iteração. Nota-se que, ao variar a semente, a envoltória dos cenários tem variações significativas principalmente no início do horizonte.

⁶ Na versão oficial do NEWAVE não é possível variar a semente, de forma a evitar perda de reprodutibilidade dos resultados.

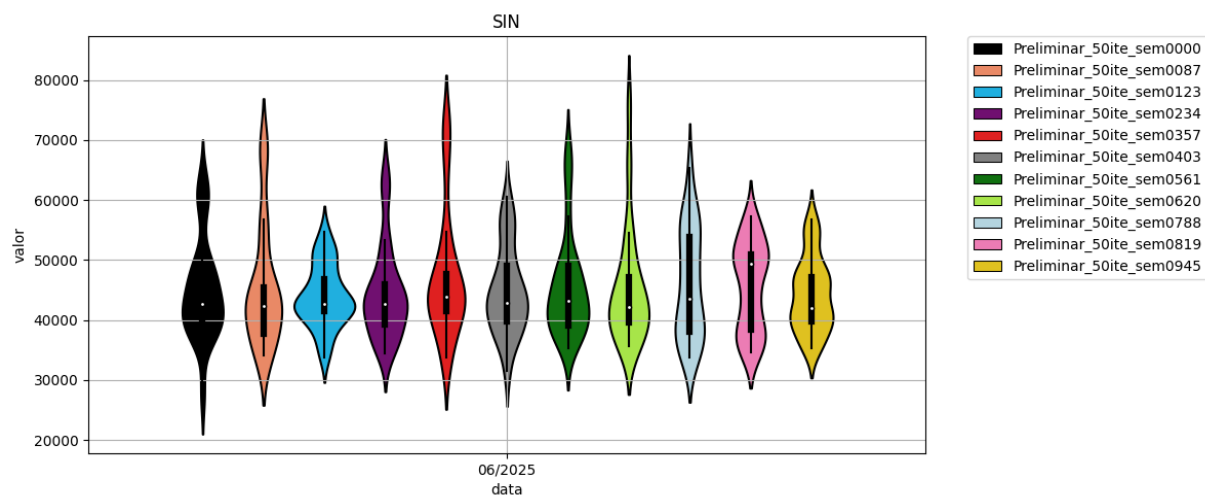


Figura 6.12 Distribuição de afluências referente às 20 aberturas do primeiro mês da etapa backward para o caso Com a UHE Canastra e variando-se a semente utilizada.

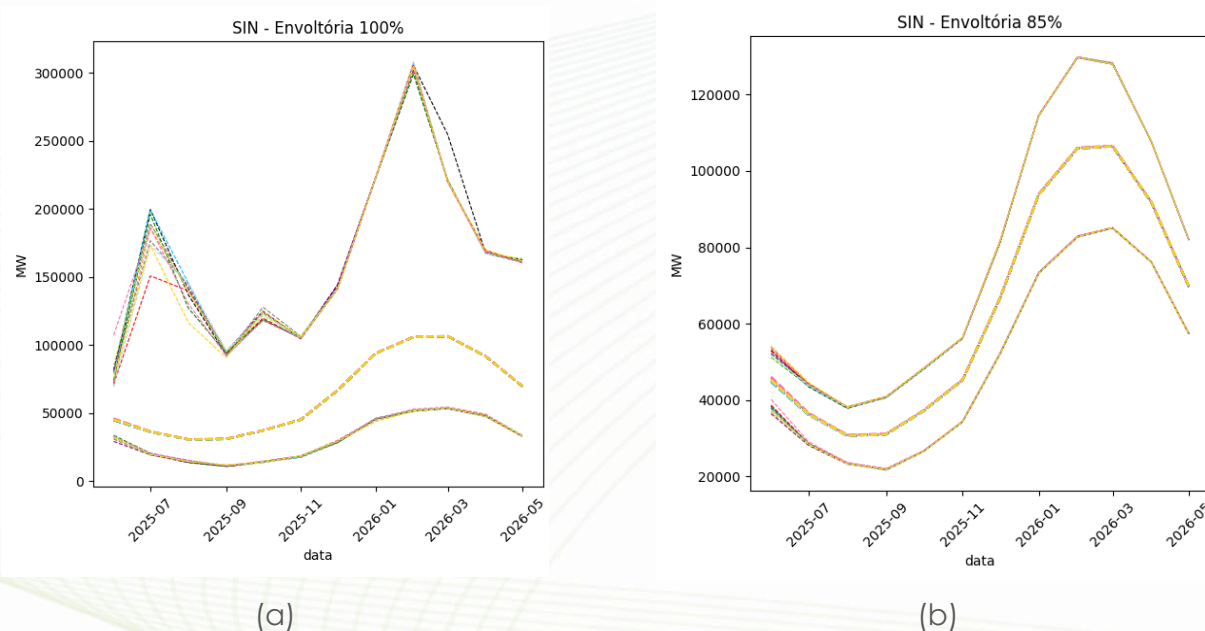


Figura 6.13 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa forward da otimização considerando 50 iterações e 200 cenários por iteração, totalizando 10mil cenários. As diferentes cores indicam as diferentes sementes utilizadas.

Já a Figura 6.14 mostra a envoltória dos cenários da backward referentes a 50 iterações, onde é mais evidente a variabilidade da envoltória com as diferentes sementes. É importante lembrar que, como os cenários backward são os que de fato definem o problema a ser resolvido, a variabilidade desses cenários tem potencial de ser mais impactante, nos resultados do NEWAVE, do que a variabilidade nos cenários forward.

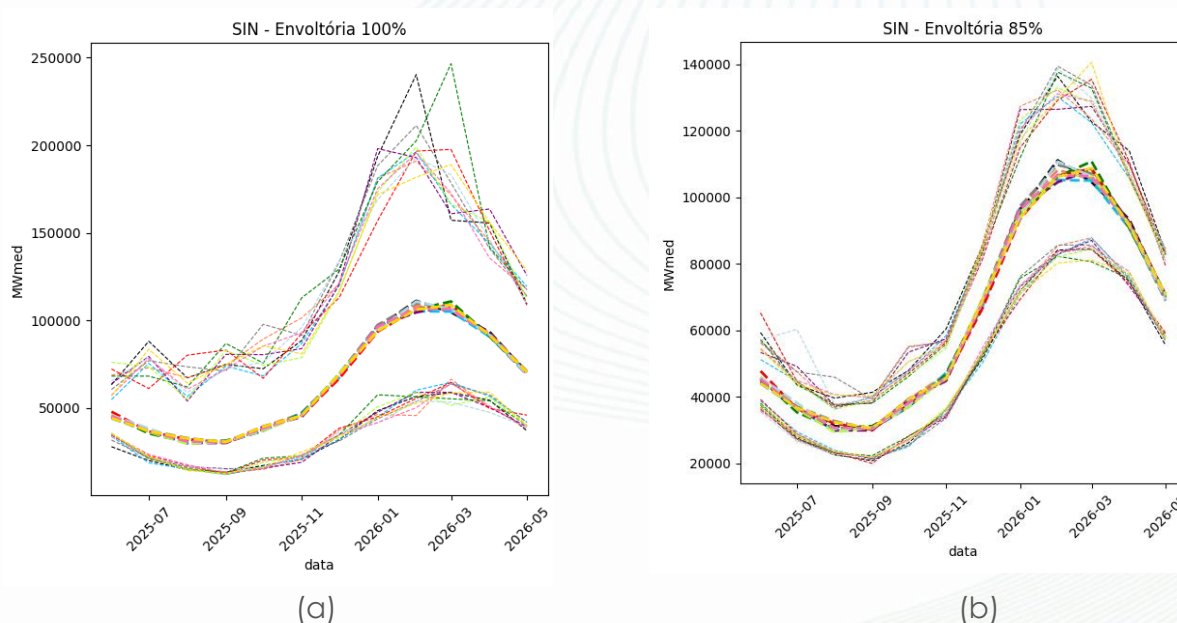


Figura 6.14 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 200 cenários por iteração e 20 realizações por estágio, totalizando 200mil cenários. As diferentes cores indicam as diferentes sementes utilizadas.

A Figura 6.15 mostra a ENA acumulada nos primeiros 12 meses para os cenários backward, ressaltando a variação que pode existir ao ser trocada a semente e evidenciando que a variação com a inclusão da usina de Canastra pode ser também observada com a troca de sementes.

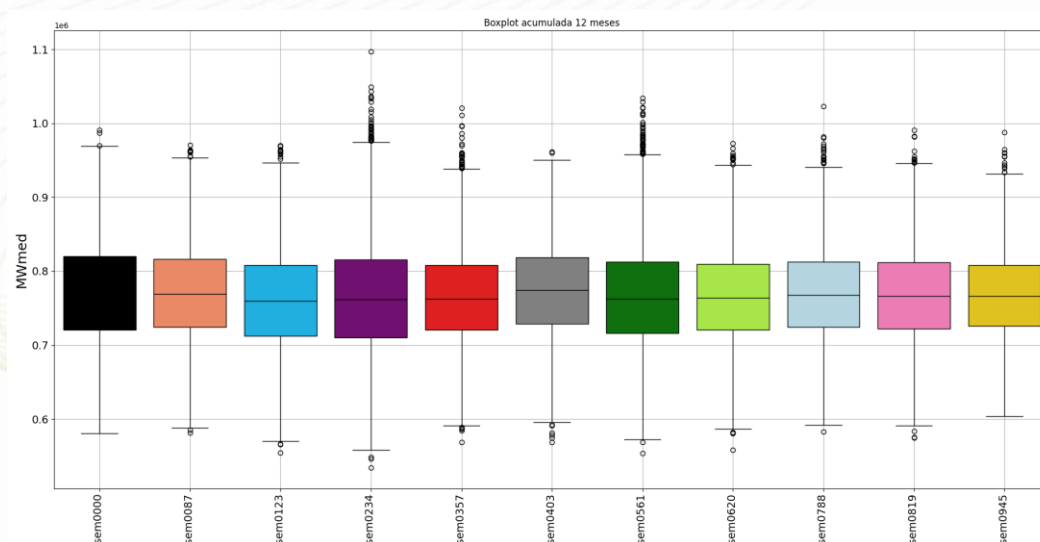


Figura 6.15 ENA acumulada no SIN referente aos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 200 cenários por iteração e 20 realizações por estágio, totalizando 200mil cenários. As diferentes cores indicam diferentes sementes.

Agora, ao focar na operação do sistema, são mostrados na Figura 6.16 os valores de ZINF e o coeficiente de variação ao longo das iterações da PDDE, para diferentes sementes, para os casos “Com” (linha contínua) e “Sem” (linha tracejada) a UHE Canastra. A linha preta corresponde à “semente 0”, que é a utilizada oficialmente. As outras curvas são as obtidas utilizando outras sementes. Ressalta-se que, para fins de melhor visualização das diferenças, a escala vertical do gráfico está translada e não se inicia na origem.

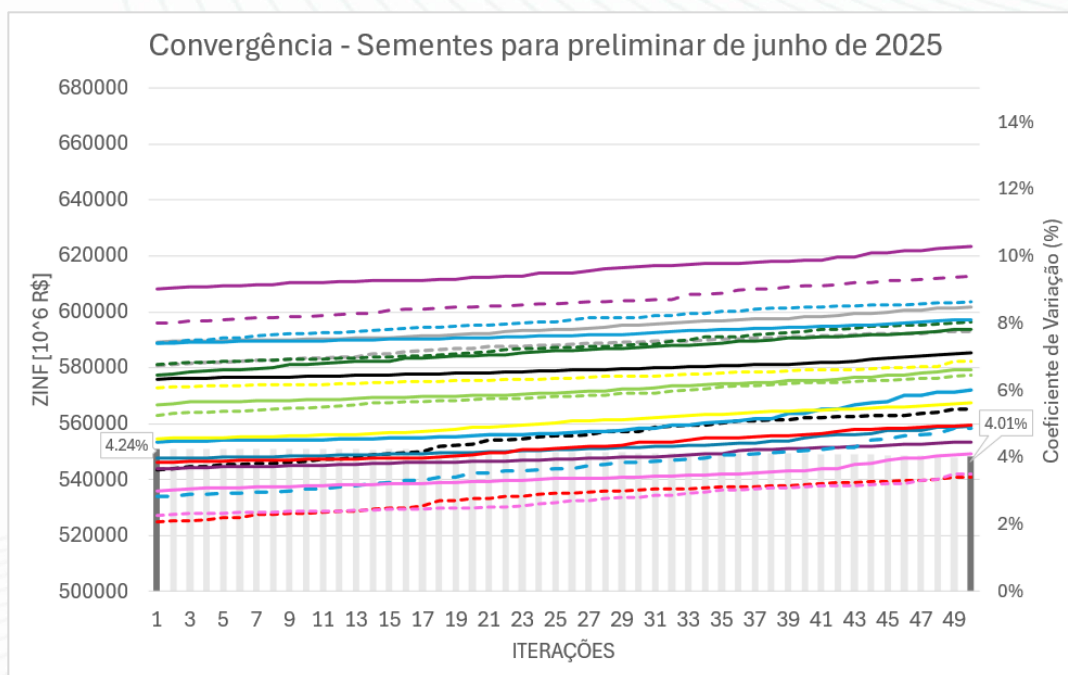


Figura 6.16 Valores de ZINF ao longo das iterações da PDDE, para diferentes sementes, para os casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra

A partir dos resultados desse gráfico, pode-se chegar a algumas conclusões:

- há uma variabilidade razoável, de forma geral, nos valores de ZINF, ao se variar a semente em ambas as situações (com e sem a UHE Canastra);
- os pares Com e Sem a UHE Canastra com a mesma semente tendem a ficar relativamente mais próximos, em relação à variabilidade geral em todos as rodadas;
- como resultado da observação feita nos dois itens acima, pode-se concluir que a variabilidade observada nos casos Com e Sem a UHE Canastra é muito menor do que a própria variabilidade observada entre os casos Com Canastra variando a semente, e entre os casos Sem Canastra variando a semente.

A última observação corrobora o fato de que a variabilidade nos resultados verificada com a inclusão ou não da UHE Canastra, nos resultados obtidos nos casos oficiais, é fruto de variação amostral, e não devido a uma modelagem inadequada quando da inclusão da UHE Canastra.

Ressalta-se que, de certa forma, uma eventual inadequação na modelagem da usina já havia sido aparentemente descartada, em virtude do que foi apresentado na seção 3.

Apresentam-se também, na Figura 6.17, os resultados de CMO para os casos Com e Sem a UHE Canastra, utilizando diferentes sementes. A mesma variabilidade nos valores de CMO no primeiro mês pode ser observada ao variar a semente, a qual, assim como ocorreu em relação aos valores de ZINF, é inferior à variabilidade observada ao se utilizar ou não a UHE Canastra na configuração.

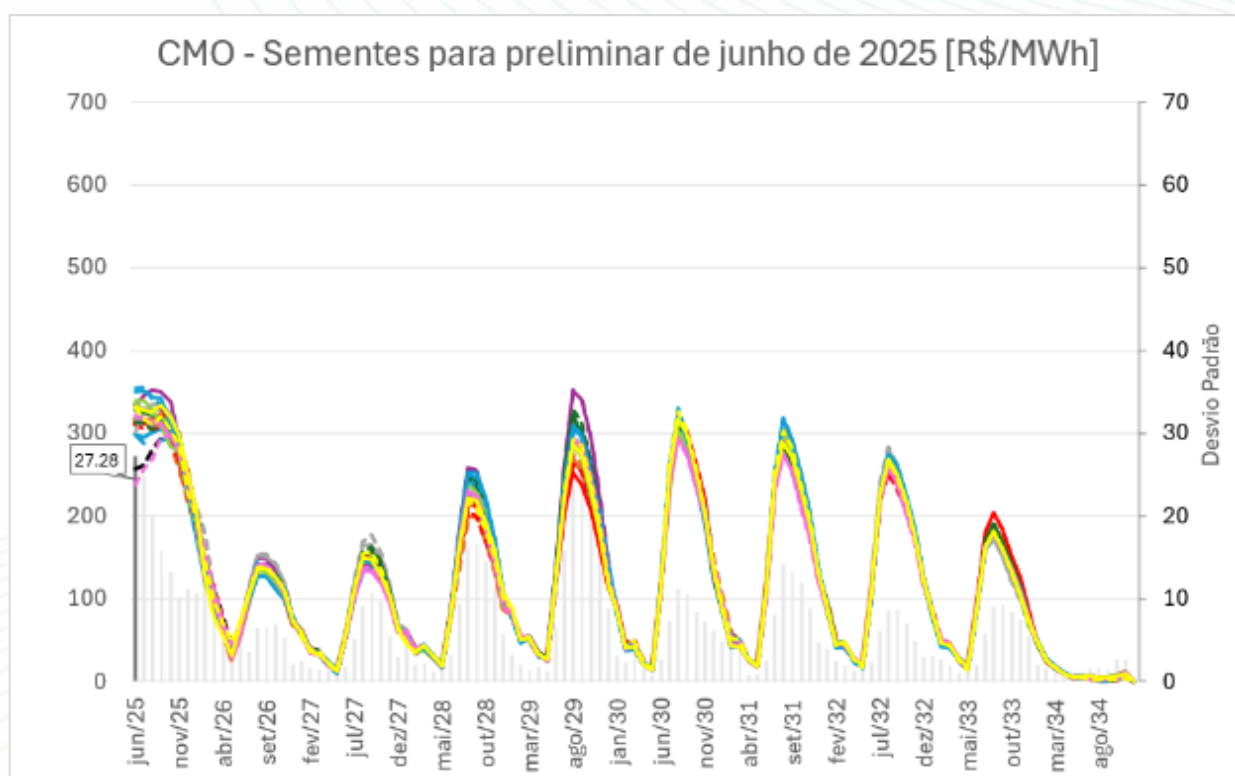


Figura 6.17 Valores de CMO nos 2.000 cenários da simulação final, para diferentes sementes, para os casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra

6.8 Variabilidade dos resultados com a semente na modelagem por REE

Na modelagem por REE, embora a entrada da UHE Canastra afete o histórico de energias utilizados no ajuste dos modelos autorregressivos agregados por REE, assim como as energias afluentes passadas, não há mudança nos ruídos gerados, uma vez que se mantém o mesmo número de objetos (componentes) na geração dos cenários, que são os REEs. Nota-se que, neste último caso, as variáveis aleatórias que definem o problema resolvidos pela PDDE, que são os ruídos das energias afluentes, serão mantidos e, portanto, espera-se menor impacto na dispersão de resultados.

No entanto, resta saber se, na modelagem a REE, que vigorava até 2024, já existia a variabilidade razoável nos valores de ZINF e CMO ao se modificar a semente utilizada para gerar os cenários.

Essa investigação foi feita executando o caso com REE com as mesmas sementes utilizadas no caso híbrido.

Primeiramente, a Figura 6.18 mostra as envoltórias de 100% e 85% dos 10mil cenários da etapa forward para todas as sementes mostradas na Figura 6.15, considerando 50 iterações e 200 cenários amostrados a cada iteração. Nota-se que existe variabilidade na envoltória quando são consideradas diferentes sementes, principalmente, quando analisamos a envoltória de 100%.

Na Figura 6.19 são mostrados os resultados para as envoltórias de 100% e 85% da backward, considerando 20 aberturas por estágio, 200 cenários amostrados na forward e 50 iterações, o que totaliza 200 mil cenários. Nota-se uma grande variabilidade em ambas as envoltórias dependendo da semente utilizada.

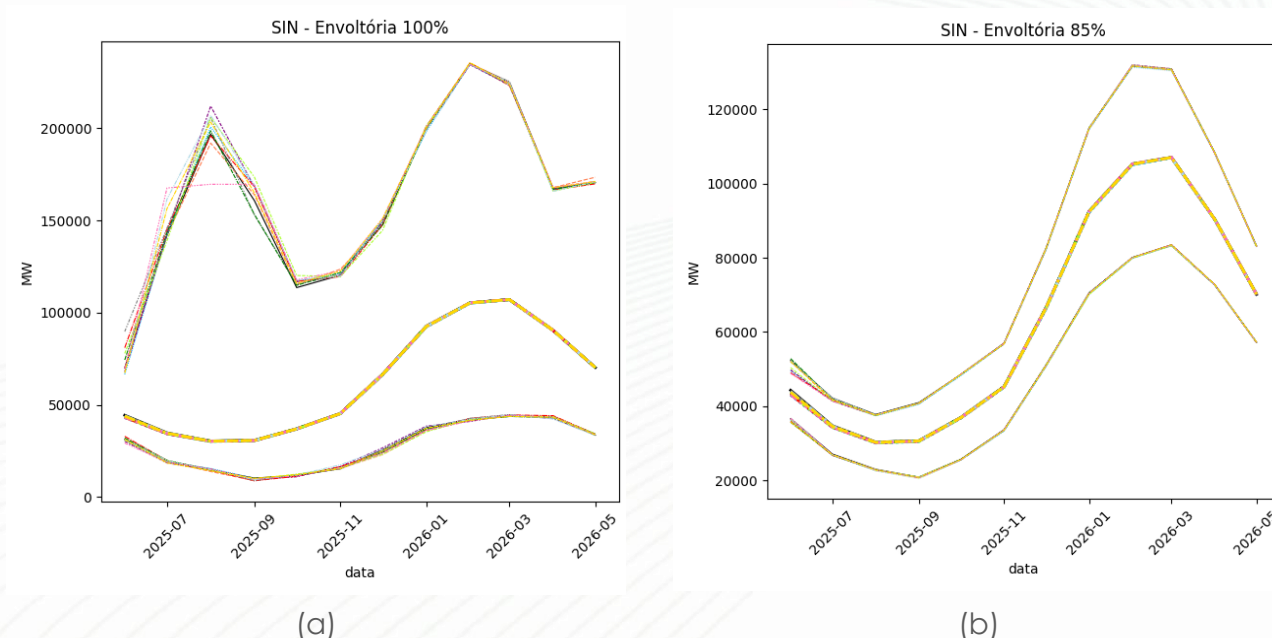


Figura 6.18 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa forward da otimização considerando 50 iterações e 200 cenários por iteração, totalizando 10mil cenários. Aqui é considerada a geração de cenários por REE. As diferentes cores indicam as diferentes sementes utilizadas.

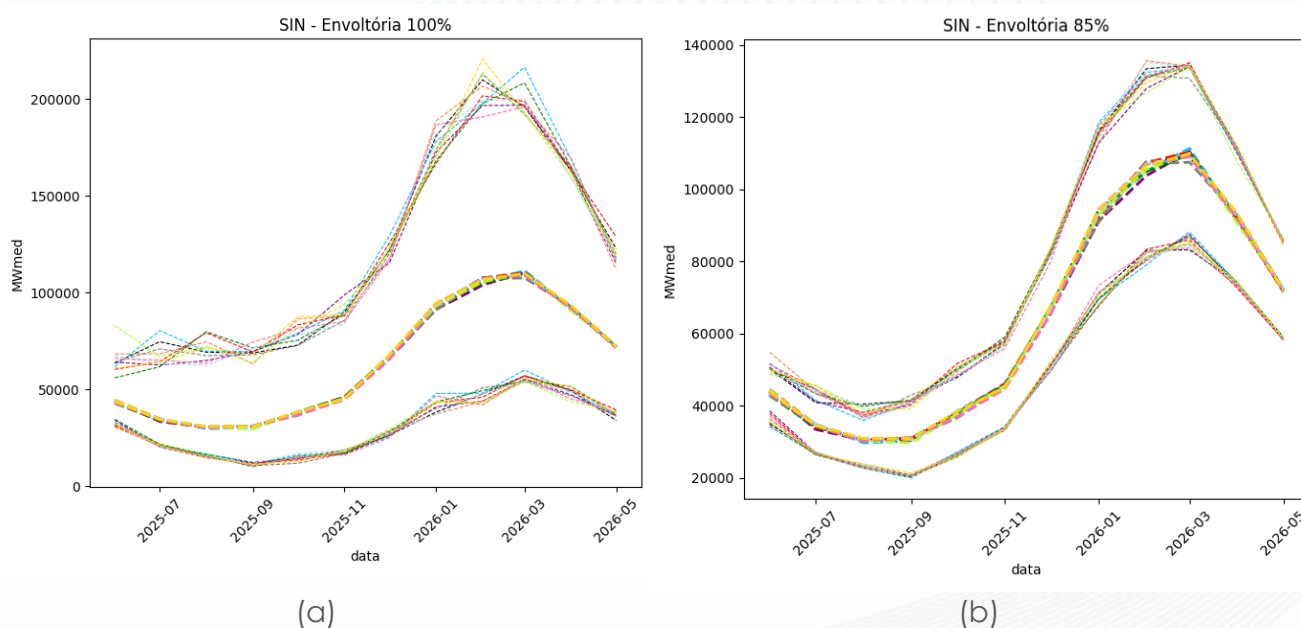


Figura 6.19 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 200 cenários por iteração e 20 realizações por estágio, totalizando 200mil cenários. As diferentes cores indicam as diferentes sementes utilizadas.

Ao comparar a variabilidade dos resultados para diferentes sementes na modelagem por REE (Figura 6.18 e Figura 6.19) com a modelagem individualizada (Figura 6.13 e Figura 6.14), observa-se que a modelagem individualizada apresenta maior variabilidade das envoltórias em função da semente utilizada. Isso era esperado, pois, nesse caso, os cenários são gerados separadamente para cada usina com sementes distintas, sendo posteriormente agrupados para compor as envoltórias por REE. Já na modelagem por REE, a variabilidade observada nas envoltórias decorre apenas da variação das sementes na geração de cenários diretamente para cada REE.

Os resultados da variabilidade com e sem a UHE Canastra no problema de otimização são mostrados na Figura 6.20 e na Figura 6.21.

Pode-se fazer os seguintes comentários:

- de fato, os resultados Com e Sem a UHE Canastra, para a mesma semente são muito próximos, devido ao fato de, na modelagem a REE, a entrada da usina não modificar a quantidade de objetos utilizados na geração dos cenários, não havendo, portanto, mudança implícita de semente, conforme explicado no início dessa seção;
- a variabilidade do ZINF e do CMO nos casos com REE é da mesma magnitude da observada nos casos híbridos, mostrados na Figura 6.16 e Figura 6.17.

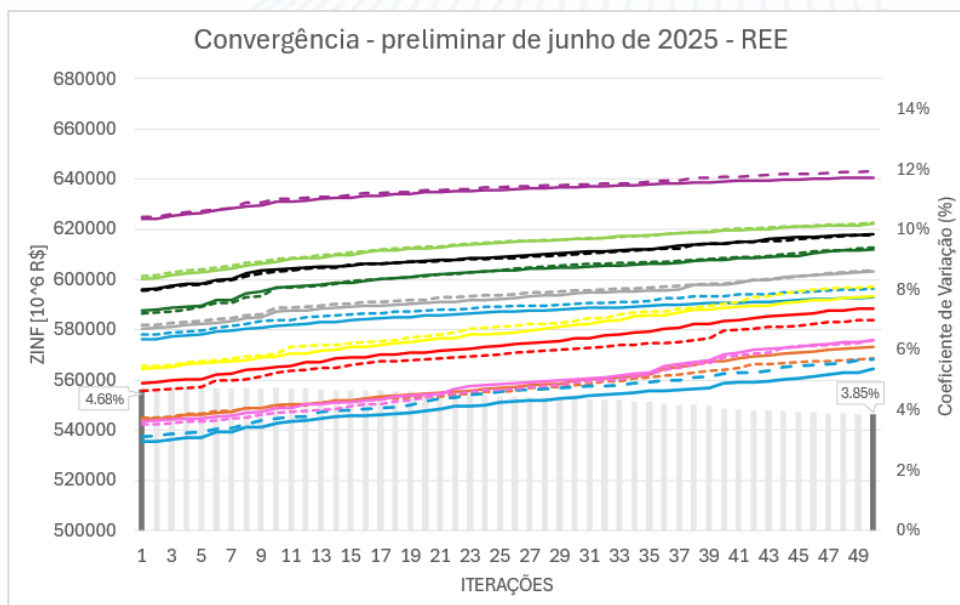


Figura 6.20 Valores de ZINF para diferentes sementes, nos casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra, na modelagem a REE

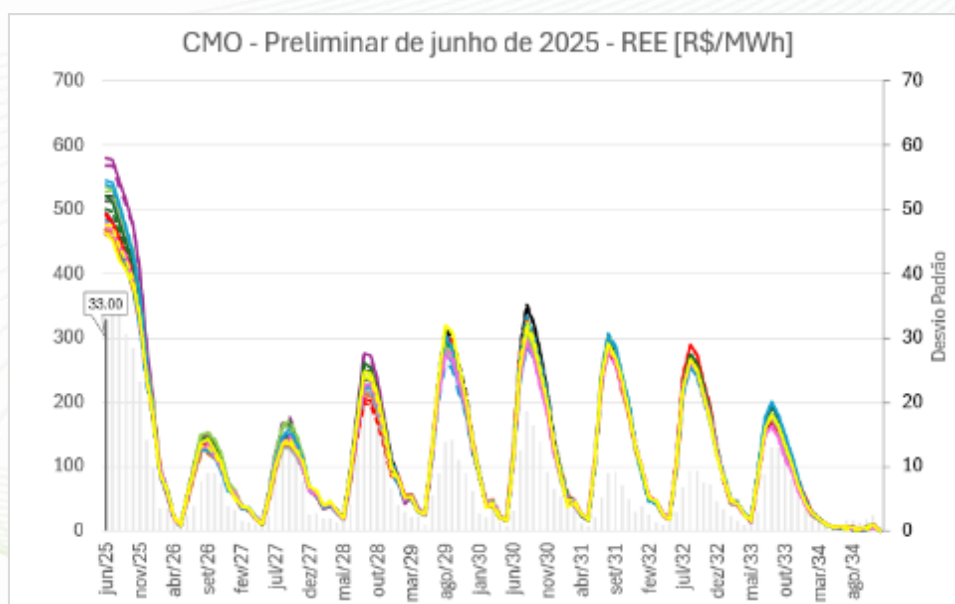


Figura 6.21 Valores de CMO para diferentes sementes, nos casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra, na modelagem a REE

6.9 Variação dos parâmetros para representação do problema e da PDDE

Nessa seção conduzimos um conjunto de experimentos variando parâmetros para representação da árvore de cenários e do próprio algoritmo da PDDE, com o objetivo de avaliar sua influência sobre a estabilidade e robustez das políticas geradas, no contexto da variabilidade amostral

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

introduzida pelo uso de diferentes sementes. Mais especificamente, analisamos o comportamento do modelo ao aumentar o grau de refinamento da política por meio de iterações adicionais, bem como ao detalhar a discretização utilizada das afluências por meio do aumento no número de cenários backward. O procedimento é semelhante ao apresentado na seção 5, porém em uma análise mais ampla, executando os casos com várias sementes.

O foco é avaliar se essas parametrizações de fato possibilitam a obtenção de soluções mais estáveis, com menor sensibilidade amostral e melhor desempenho em termos de ZINF e CMO.

6.9.1 Aumento no número de cenários (aberturas) backward

Inicialmente, avaliou-se o impacto do aumento no número de aberturas da árvore backward, buscando uma representação mais refinada da incerteza contínua das afluências. A expectativa é que, com uma discretização mais detalhada dos cenários, a variabilidade entre diferentes sementes seja reduzida, já que o espaço de possíveis cenários é mais bem amostrado. Essa melhora tende a reduzir a dispersão dos resultados e tornar a política gerada mais estável frente às variações amostrais. Conforme ilustrado na Figura 6.22 e Figura 6.23, observa-se uma redução significativa da dispersão do ZINF, além da redução na variabilidade do CMO, em comparação com os resultados mostrados nos gráficos de cima e de baixo, respectivamente, da Figura 6.21. No caso específico do CMO observa-se que, embora a redução da variabilidade seja mais discreta nos primeiros meses, apresenta-se mais significativa ao longo do horizonte.

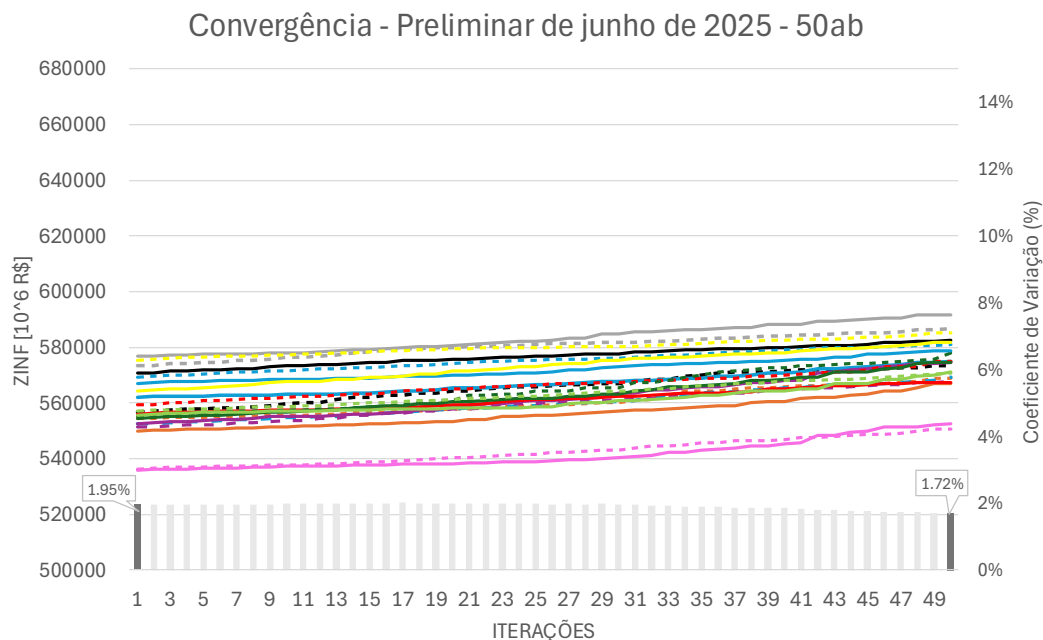


Figura 6.22 Valores de ZINF para diferentes sementes, com 50 aberturas para a representação da árvore backward de cada semente

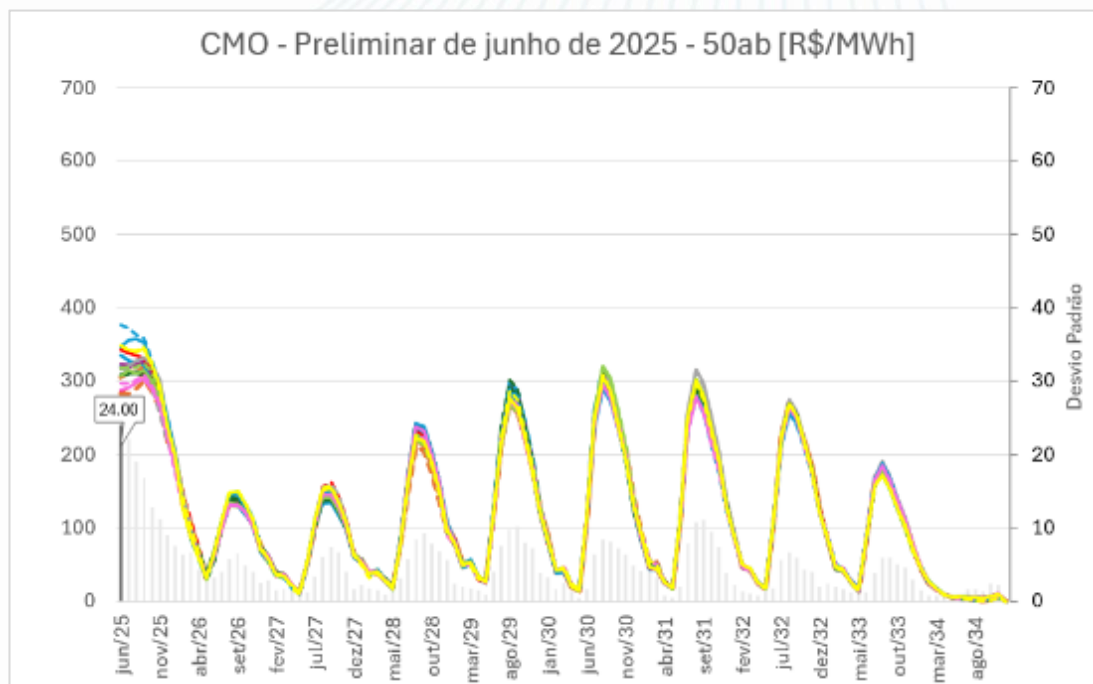


Figura 6.23 Valores de CMO, para diferentes sementes, com 50 aberturas para a representação da árvore backward de cada semente

É importante destacar que, ao aumentar a quantidade de cenários backwards no processo de amostragem, ocorre naturalmente uma alteração nas sementes utilizadas. Isso significa que uma determinada semente inicial com X aberturas não é necessariamente a mesma quando se utiliza Y aberturas. No entanto, apesar dessa diferença, o conjunto de resultados continua válido, pois trata-se de uma nova amostragem com o mesmo número de sementes sendo avaliadas. Dessa forma, os resultados refletem a variabilidade esperada do processo, mantendo a consistência da análise.

6.9.2 Aumento no número de iterações da PDDE

Nesta fase da análise, avaliamos o impacto de permitir que o algoritmo execute uma quantidade maior de iterações, a fim de dar um grau maior de maturidade à política construída. A ideia é que, ao permitir um refinamento mais prolongado da função de custo futuro, os resultados se tornem mais estáveis frente às variações amostrais.

Como mostrado na Figura 6.24 e Figura 6.25, embora a redução da dispersão do ZINF tenha sido modesta, possivelmente significando ainda a necessidade de mais iterações para a estabilidade do processo, observamos uma melhora mais significativa na estabilidade do CMO, com menor dispersão entre as diferentes sementes utilizadas.

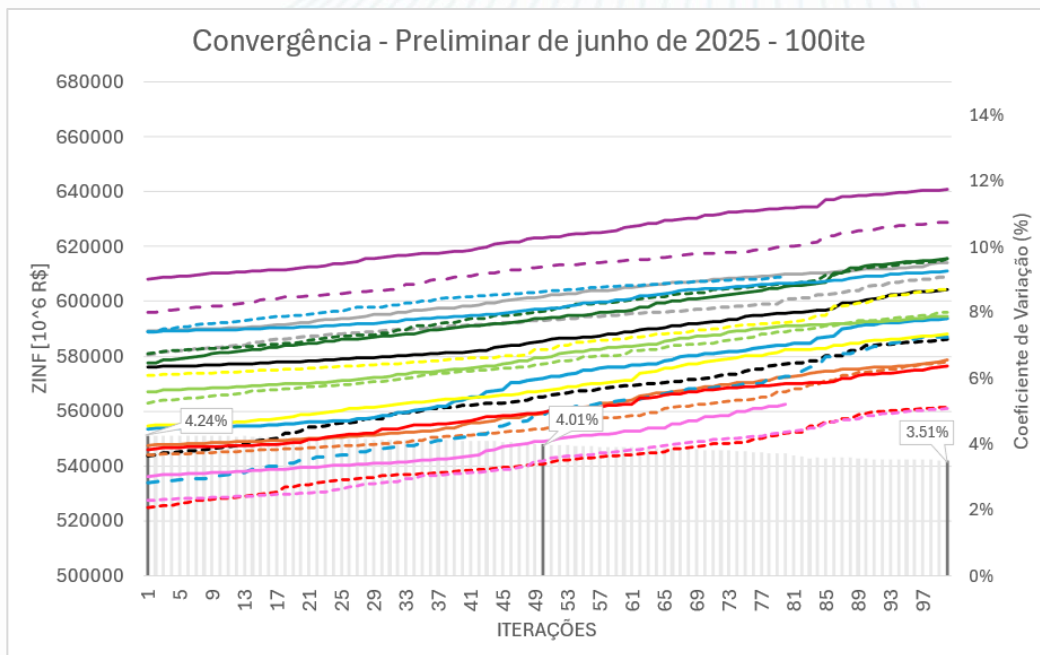


Figura 6.24 - Valores de ZINF para diferentes sementes, com 100 iterações do cálculo da política.

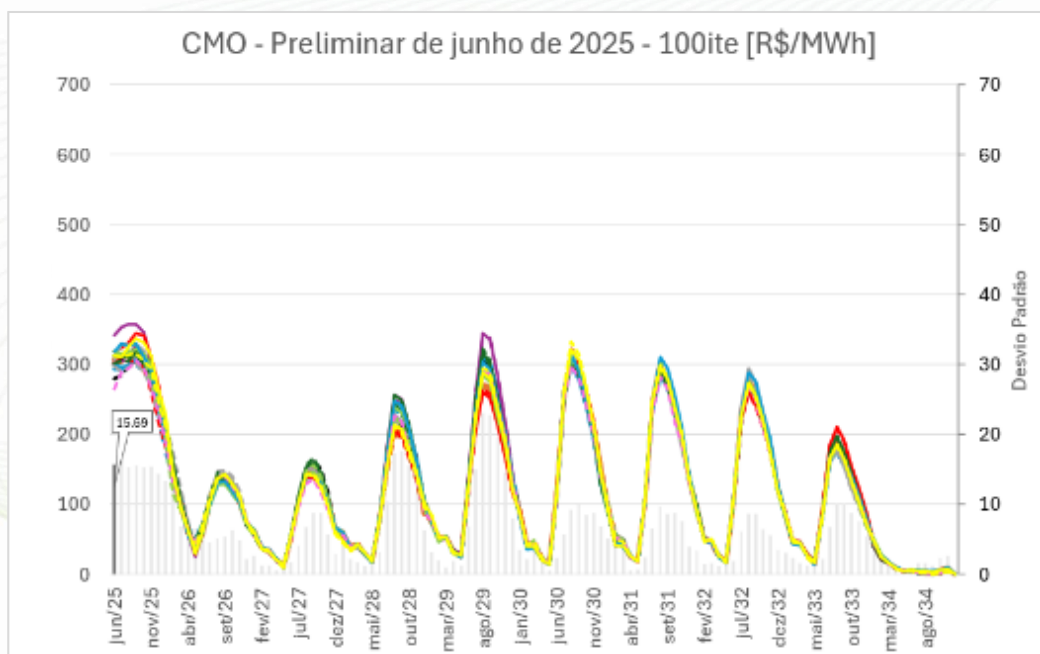


Figura 6.25 Valores de CMO para diferentes sementes, com 100 iterações do cálculo da política.

6.10 Novas Eficientizações para Resolução do Problema

Como discutido ao longo deste relatório, o principal caminho para reduzir a variabilidade dos resultados envolve os parâmetros para construção da árvore de cenários backward e os parâmetros da PDDE, de modo a tornar a função de custo futuro final mais robusta e madura.

Nos últimos meses, o CEPEL implementou diversas iniciativas voltadas à redução do tempo computacional, sem comprometer a qualidade das soluções obtidas. O objetivo dessas ações foi não apenas otimizar o tempo computacional dos casos oficiais, mas também possibilitar execuções com parametrizações mais amplas, como o aumento no número de iterações, quantidade de séries forwards por iteração e quantidade de cenários backwards.

Dentre essas iniciativas, destacam-se:

- Integração com solvers mais eficientes e robustos, como o Gurobi e o CPLEX
- função de custo futuro externa para o período pós estudo
- redução dos hiperplanos da FPHA [13]
- seleção de cortes na simulação final [14]
- eliminação de cortes de Benders [15]

Essas novas funcionalidades atuam de forma complementar na redução do tempo de execução. Dessa maneira, o caso definitivo do PMO 06/2025, com 50 iterações, foi executado com 96 processos e com algumas das parametrizações descritas neste relatório, incorporando algumas dessas iniciativas, sob a denominação "FCFpos+FPHAang+SCSF+ElimCor". A Tabela 6.1 apresenta a parametrização utilizada em cada execução.

Tabela 6.1 Parametrização dos casos para análise do tempo computacional

Nome	# Iterações	# Cenários Forwards	# Aberturas Backwards
Oficial	50	200	20
50 aberturas	50	200	50
300 forwards	50	300	20

A Figura 6.26 apresenta o tempo de execução, por etapa e total, utilizando a eficientização base (já aplicada oficialmente).

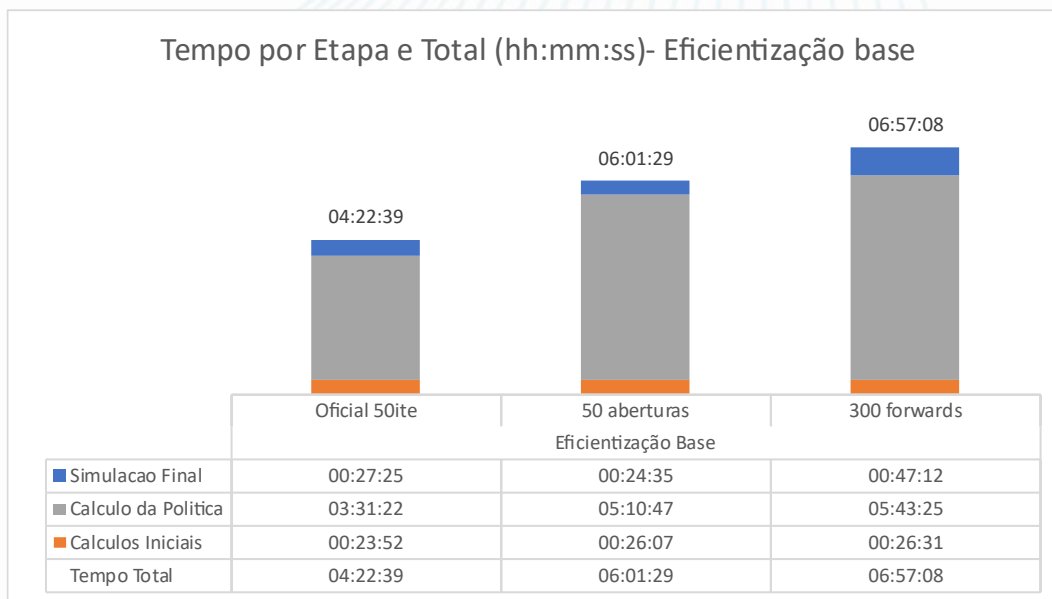


Figura 6.26 Tempo de execução, por etapa e total, utilizando a eficientização base.

A Figura 6.27 apresenta o tempo de execução, por etapa e total, utilizando a eficientização FCFpos+FPHAang+SCSF+ElimCor, em complemento à eficientização base.

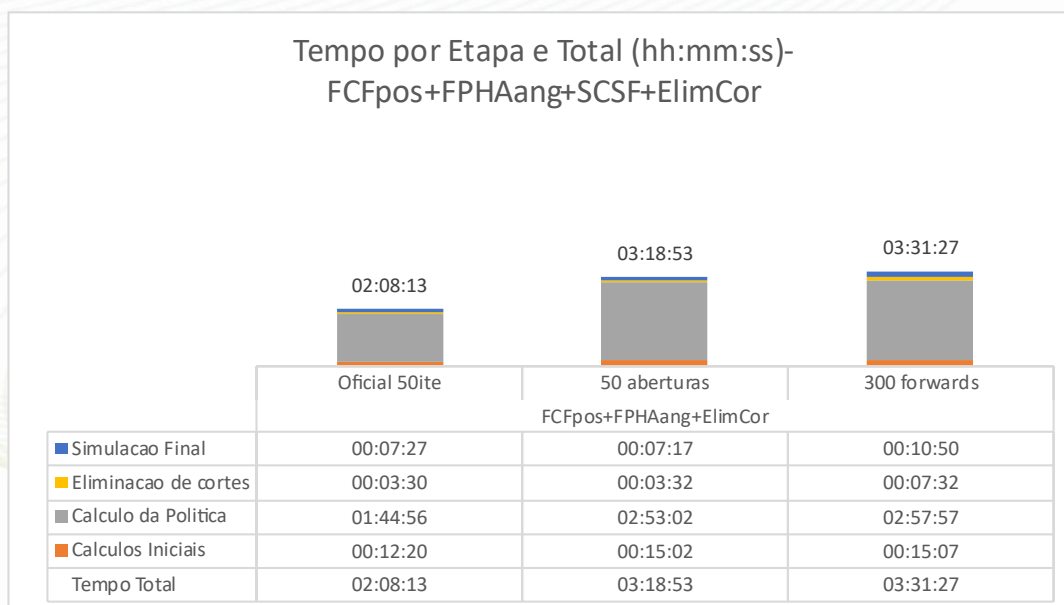


Figura 6.27 Tempo de execução, por etapa e total, utilizando a eficientização FCFpos+FPHAang+SCSF+ElimCor.

A adoção da eficientização FCFpos+FPHAang+SCSF+ElimCor proporciona uma redução expressiva no tempo de execução, alcançando reduções de quase metade do tempo total. Essas reduções de tempo são mostradas na Figura 6.28.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

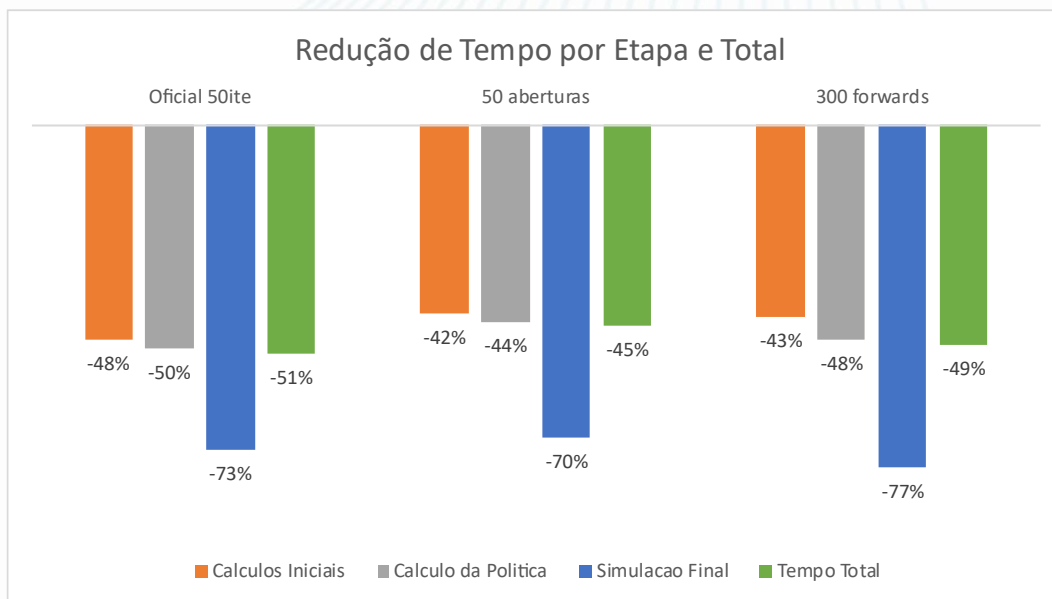


Figura 6.28 Redução do tempo de execução, por etapa e total, utilizando a efficientização FCFpos+FPHAang +SCSF+ElimCor em relação a efficientização base.

Portanto, o uso desses novos desenvolvimentos pode viabilizar o uso de maiores parametrizações da PDDE afim de se ter resultados mais robustos.

6.11 Variação dos parâmetros do critério de aversão ao risco (CVaR)

Nessa seção conduzimos um conjunto de experimentos variando os parâmetros do critério de aversão ao risco (CVaR) [16], [17], com o objetivo de avaliar sua influência sobre a estabilidade e robustez das políticas geradas, no contexto da variabilidade amostral introduzida pelo uso de diferentes sementes. Mais especificamente, analisamos o comportamento do modelo ao definir os parâmetros α (alpha) e λ (lambda)⁷ com os valores utilizados oficialmente pelo ONS e CCEE no ano de 2024 ($\alpha = 25\%$ e $\lambda = 35\%$), bem como ao não utilizar o CVaR. O procedimento é semelhante ao apresentado na seção 6.6, utilizando tanto a modelagem híbrida quanto a modelagem a REE.

6.11.1 CVaR $\alpha = 25\%$ e $\lambda = 35\%$ na modelagem híbrida

Inicialmente, avaliou-se o impacto da redução da aversão ao risco na variabilidade dos resultados. Conforme ilustrado na Figura 6.29, observa-se uma redução significativa da dispersão do ZINF, além da redução, também significativa, na variabilidade do CMO.

⁷ o parâmetro α corresponde ao percentual de cenários por período para os quais se deseja proteger, e o parâmetro λ é o peso (em escala percentual) que deve ser dado ao valor esperado desses cenários, sendo o valor complementar a esse peso aplicado ao valor esperado do conjunto de todos os cenários backward.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

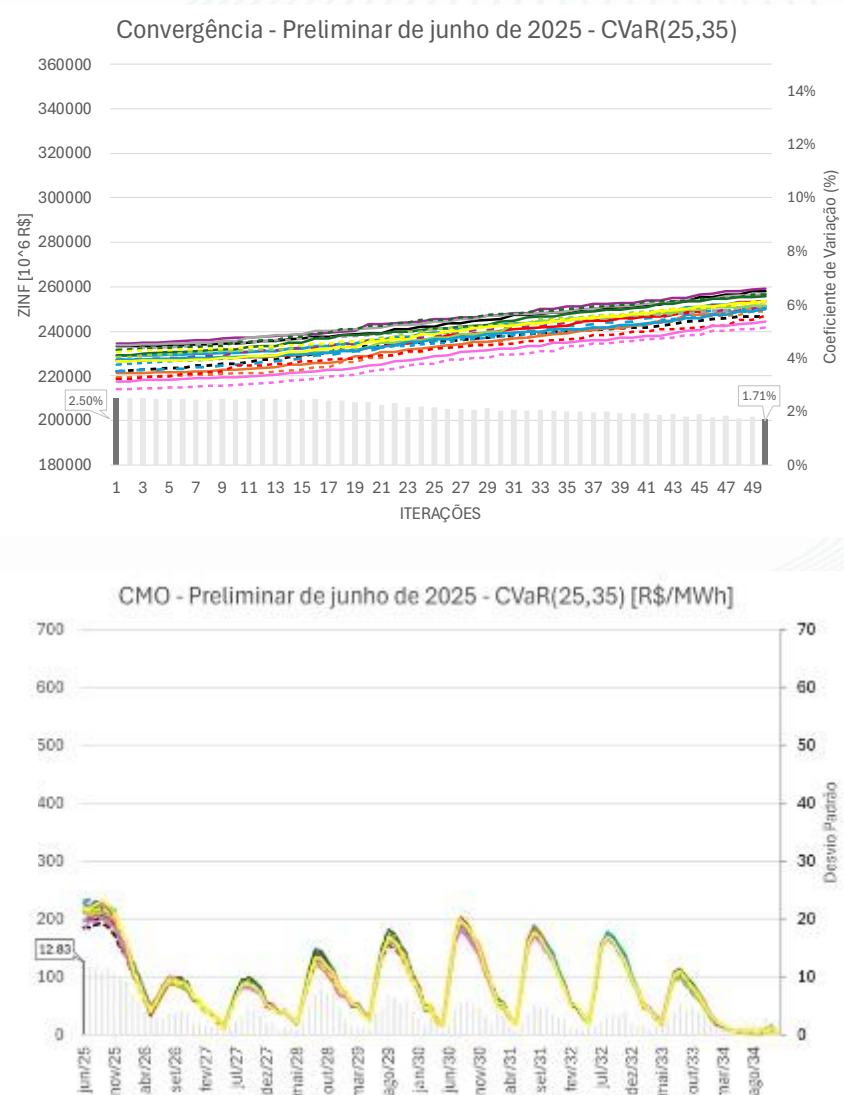


Figura 6.29 Valores de ZINF (acima) e CMO (abaixo), para diferentes sementes, nos casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra, na modelagem híbrida utilizando CVaR(25,35).

6.11.2 Neutro a risco na modelagem híbrida

Nesta fase da análise, avaliamos o impacto de não utilizar o CVaR, ou seja, os casos executados estão neutros ao risco.

Conforme ilustrado na Figura 6.30, observa-se que o caso neutro a risco quase não possui variabilidade de ZINF e CMO com diferentes sementes.

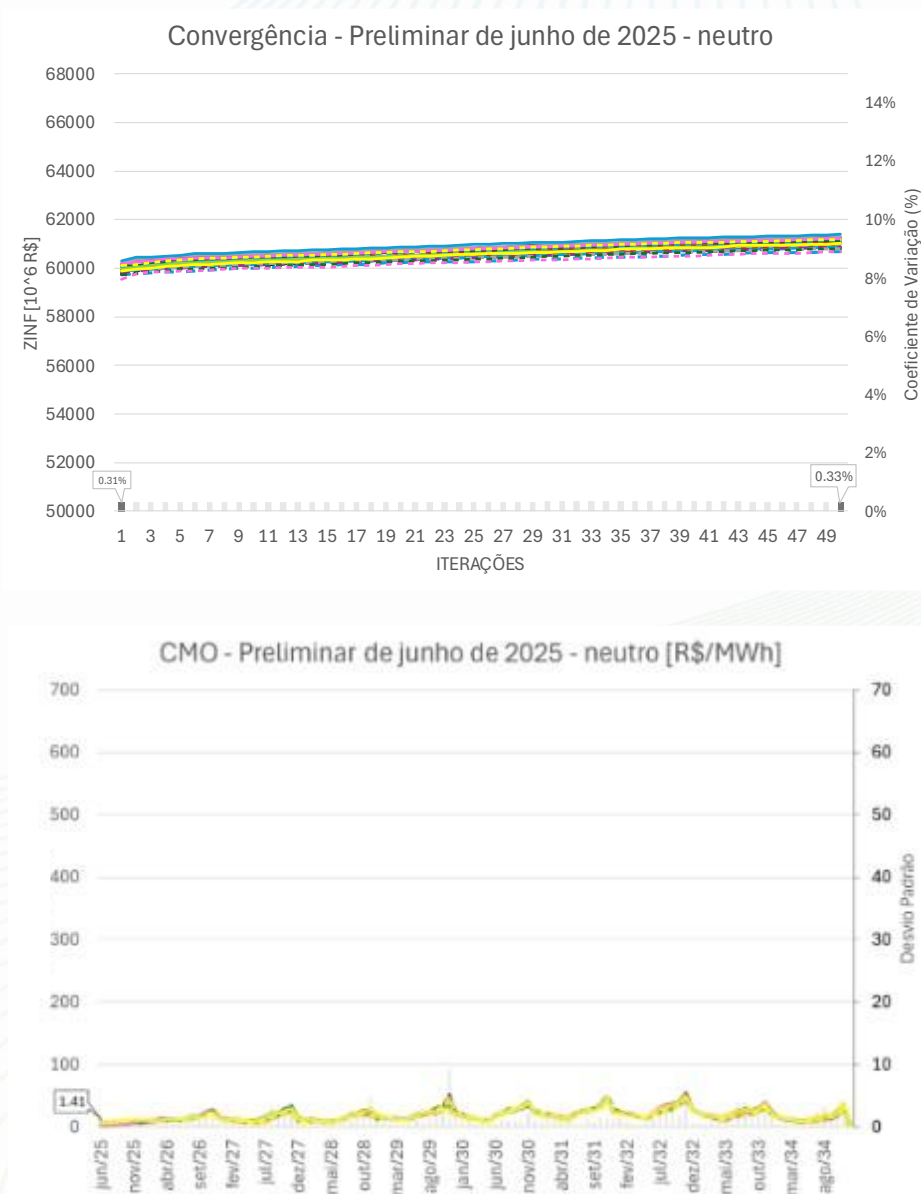


Figura 6.30 Valores de ZINF (acima) e CMO (abaixo), para diferentes sementes, nos casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra, na modelagem híbrida neutro a risco.

6.11.3 CVaR $\alpha = 25\%$ e $\lambda = 35\%$ na modelagem por REE

Como realizado anteriormente, esta seção e a subsequente abordam o impacto da diminuição da aversão ao risco, mas desta vez na modelagem por REE. Conforme ilustrado na Figura 6.31, observa-se uma redução significativa da dispersão do ZINF, além da redução, também significativa, na variabilidade do CMO.

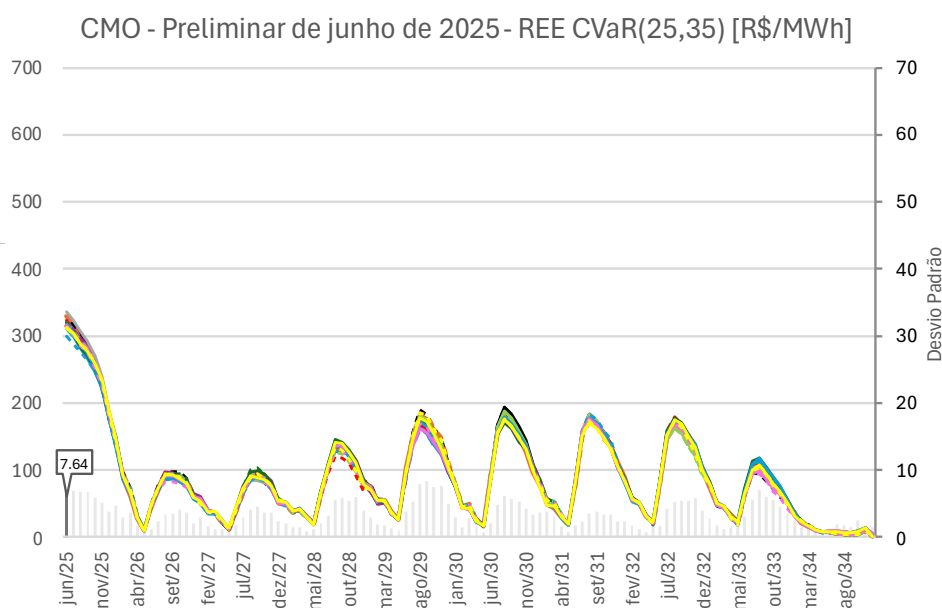
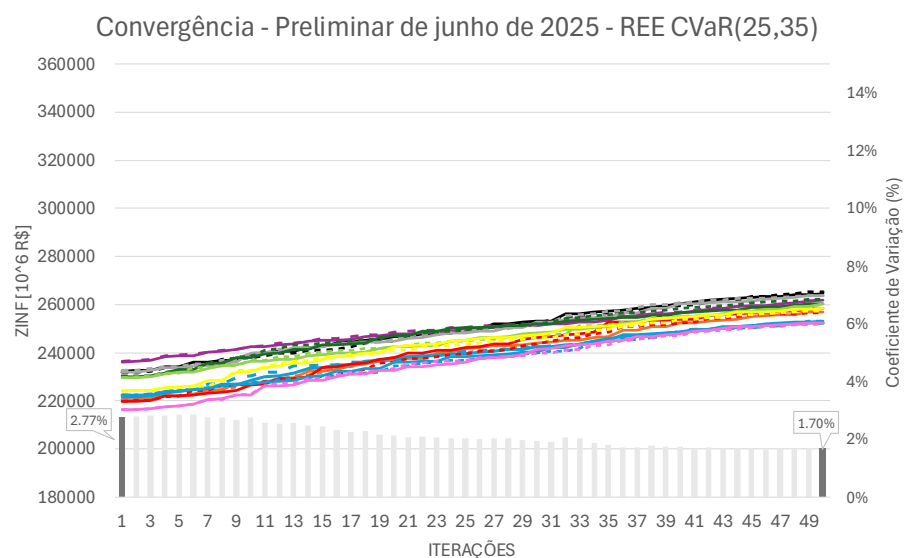


Figura 6.31 Valores de ZINF (acima) e CMO (abaixo), para diferentes sementes, nos casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra, na modelagem a REE utilizando CVaR(25,35).

6.11.4 Neutro a risco na modelagem por REE

Nesta fase da análise, avaliamos o impacto de não utilizar o CVaR, ou seja, os casos executados estão neutros ao risco. Conforme ilustrado na Figura 6.32, observa-se que o caso neutro a risco quase não possui variabilidade de ZINF e CMO com diferentes sementes.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

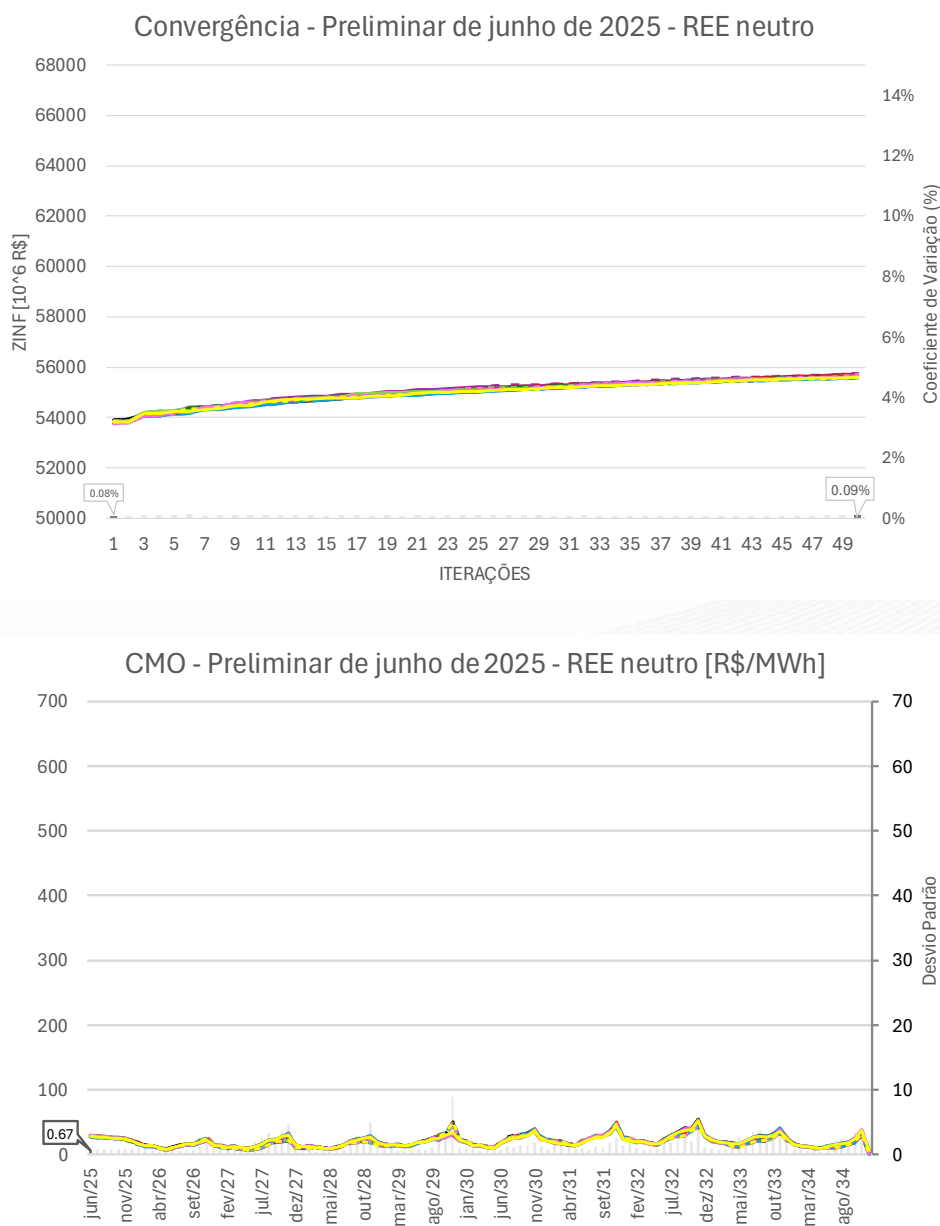


Figura 6.32 Valores de ZINF (acima) e CMO (abaixo), para diferentes sementes, nos casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra, na modelagem a REE neutro a risco.

6.12 Resultados Com e Sem a UHE Canastra removendo o efeito de mudança nos cenários

Conforme explicado no início do capítulo 6.6, a inclusão da UHE Canastra traz uma mudança intrínseca na semente utilizada para gerar os cenários. Como os resultados da seção 6.7 mostram que as sementes afetam a variabilidade nos resultados, seria interessante comparar os resultados dos casos Com e Sem a UHE Canastra porém removendo o efeito da mudança de semente. Este

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

teste foi realizado em um estudo utilizando uma versão interna do modelo NEWAVE⁸, gerada pelo CEPEL, onde foram realizados os seguintes procedimentos:

- executaram-se os casos Sem e Com a UHE Canastra, apresentados anteriormente,
- executou-se o caso sem a UHE Canastra, porém substituindo os cenários e modelos autorregressivos de todas as usinas pelos cenários obtidos com o caso Com a UHE Canastra. Este caso foi denominado “SemCanastra-Cenários Com Canastra”

Os resultados de ZINF e CMO entre os três casos são mostrados nas figuras abaixo (Figura 6.33 e Figura 6.34). Observa que os resultados comparativos removendo o efeito da semente (ou seja, comparando os casos “Com UHE Canastra” X “Sem UHE Canastra – Cenários Com UHE Canastra”) são muito próximos. Este resultado corrobora, ainda mais, o fato de que a variabilidade de resultados não se deve à inclusão da UHE Canastra em si, mas sim devido à mudança na semente, que ocorre de forma implícita quando da inclusão dessa usina.

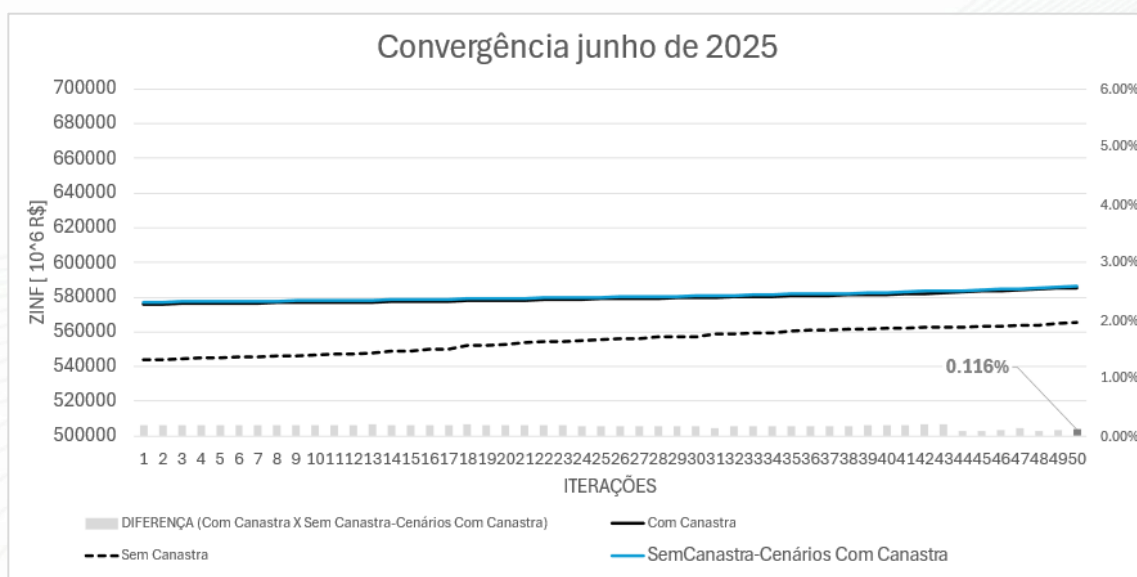


Figura 6.33 - Resultados de ZINF para os casos Sem Canastra, Com Canastra e Sem Canastra porém utilizando os cenários Com Canastra.

⁸ A versão interna do modelo NEWAVE utilizada nesta análise é exclusivamente para fins exploratórios e não se constitui versão homologada para uso regulatório ou oficial.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

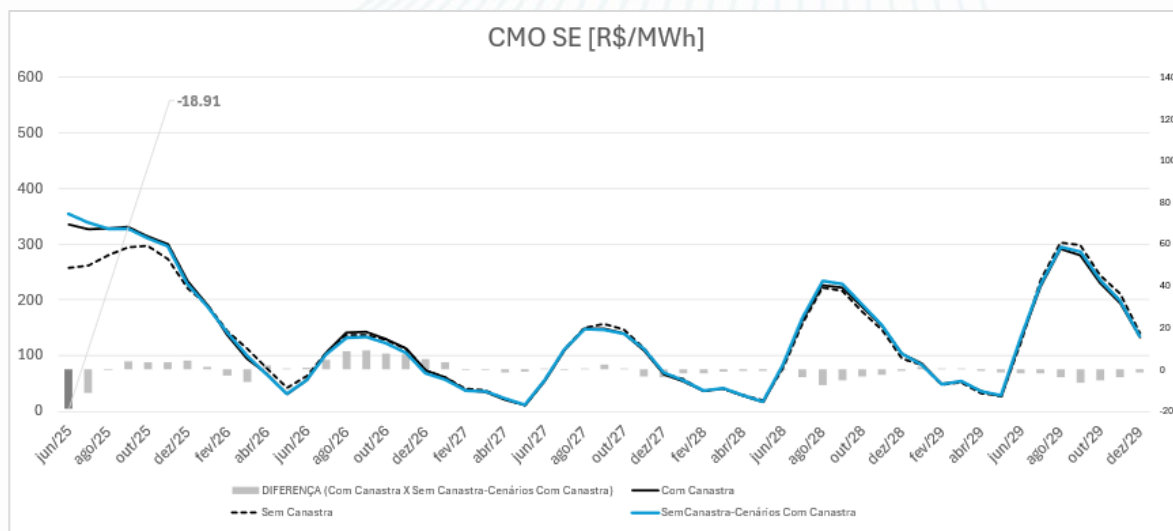


Figura 6.34 CMO para os casos Sem Canastra, Com Canastra e Sem Canastra porém utilizando os cenários com canastra

6.13 Solução conjuntural para impedir a variação amostral nas mudanças de configuração da modelagem individualizada

A avaliação realizada na seção 6.12 indicou que a variabilidade dos resultados, ao alterar a configuração hidrelétrica, é substancialmente reduzida quando os cenários de afluência às usinas hidrelétricas são fixados. Nesse contexto, o CEPEL disponibilizou a versão 31_centos do Newave, que fixa a quantidade de sementes geradas além de realizar o mapeamento pelo número do posto de medição das UHEs nos períodos individualizados.

Antes da versão 31_centos, a atribuição das sementes para a geração dos cenários de afluências das UHEs ocorria de forma sequencial: a primeira usina cadastrada utilizava a primeira semente, a segunda usina cadastrada utilizava a segunda semente, e assim sucessivamente, conforme ilustrado na figura Figura 6.35.

As versões após a versão 31_centos realizam o mapeamento das sementes utilizadas na geração de cenários com base no número do posto de medição de vazão da UHE, além de gerar uma quantidade fixa de sementes igual a capacidade máxima de postos do caso. O objetivo dessa mudança é garantir que, independentemente da quantidade de usinas hidrelétricas no estudo e de suas posições no arquivo de cadastro, a semente atribuída a determinada UHE seja sempre a mesma.

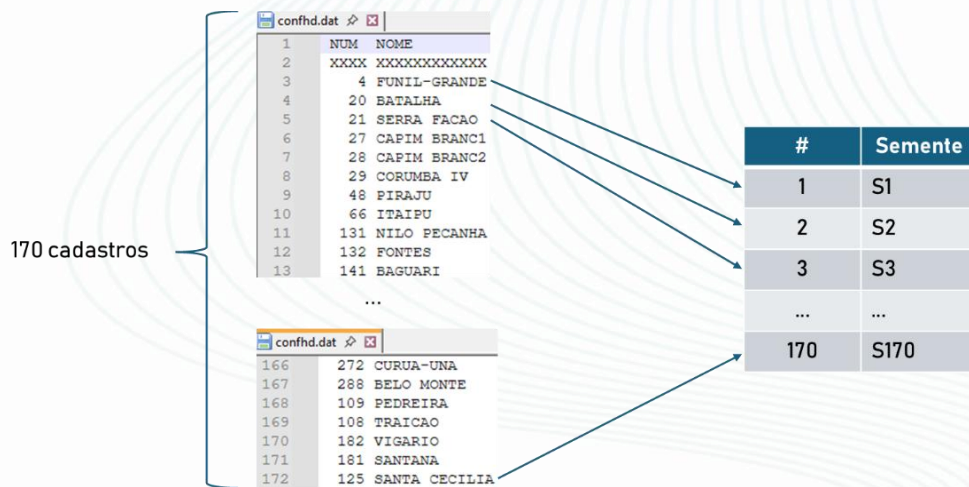


Figura 6.35 Esquematização da atribuição das sementes antes da versão 31_centos .

Para isso, passaram a ser geradas tantas sementes quanto forem os postos passíveis de utilização no arquivo de vazões históricas que, na versão atual do modelo, totalizam 320 ou 600 postos. Além disso, cada usina hidrelétrica passa a utilizar a semente correspondente ao número do seu posto. Por exemplo, a UHE com posto 22 utiliza a 22ª semente, a UHE com posto 66 utiliza a 66ª semente, e assim por diante, como mostrado no esquema abaixo.

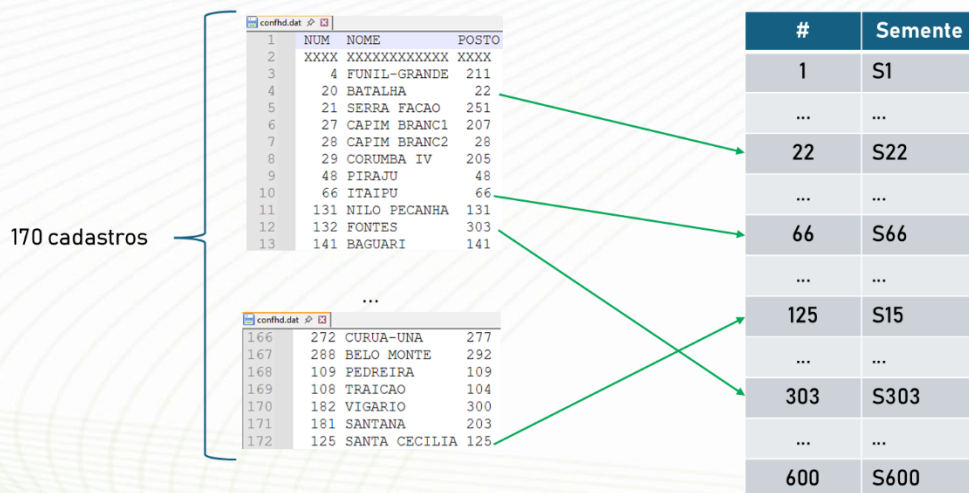


Figura 6.36 Esquematização da atribuição das sementes mapeadas a partir da versão 31_centos.

A versão 31_centos foi utilizada para reproprocessar o estudo da seção 6.7, consistindo na execução dos casos com e sem a UHE Canastra utilizando 11 sementes diferentes.

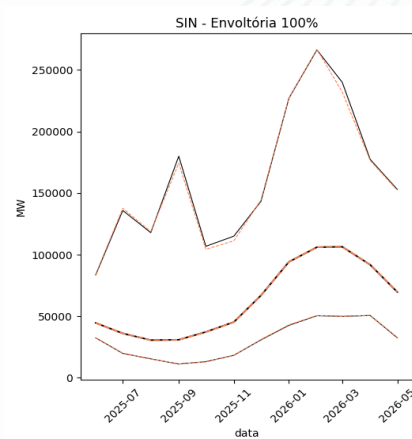
Inicialmente, ao analisar os resultados apenas da semente original, observa-se uma aproximação das envoltórias com e sem a UHE Canastra para os cenários da forward (Figura 6.), backward (Figura 6.38) e da simulação final (Figura 6.39), diferindo marcadamente dos resultados apresentados na Seção 5.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

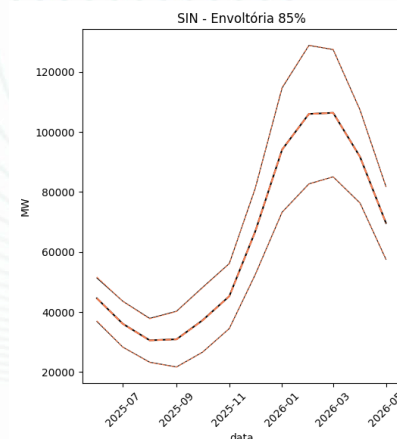
Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

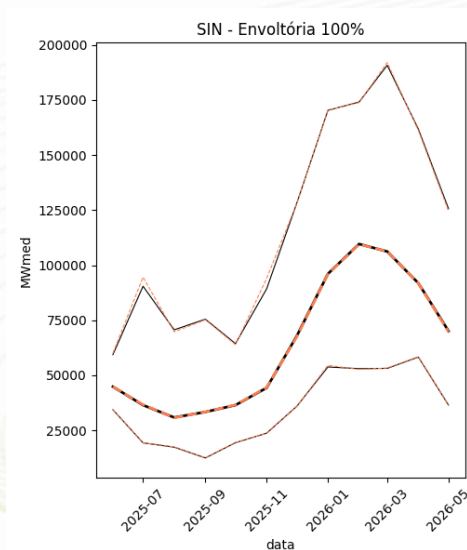


(a)

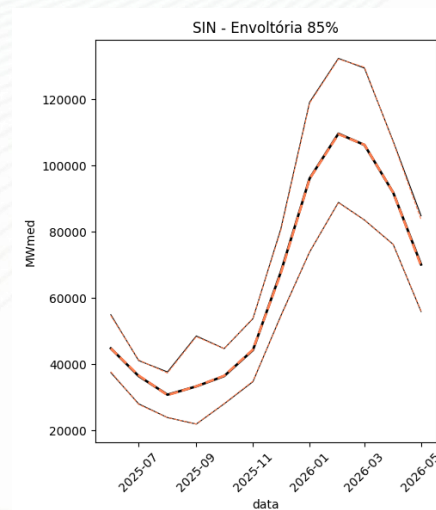


(b)

Figura 6.37 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa forward da otimização considerando 50 iterações e 200 cenários por iteração, totalizando 10mil cenários. O caso com Canastra é representado pela linha preta cheia e sem Canastra pela linha laranja pontilhada.

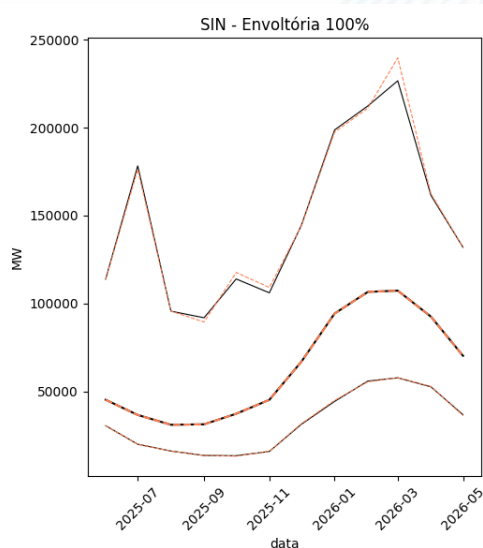


(a)

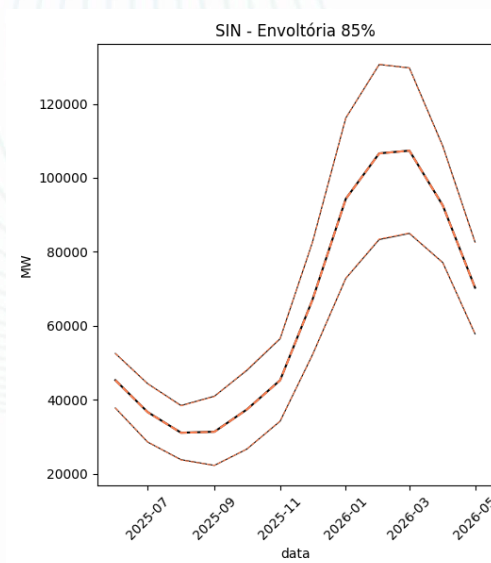


(b)

Figura 6.38 Envoltória dos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 200 cenários por iteração e 20 realizações por estágio, totalizando 200mil cenários. O caso com Canastra é representado pela linha preta e sem Canastra pela linha laranja.



(a)



(b)

Figura 6.39 Envolvência dos 2mil cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na simulação. O caso com Canastra é representado pela linha preta cheia e sem Canastra pela linha laranja pontilhada.

Além disso, observa-se uma aproximação tanto do ZINF quanto do CMO ao representar a UHE Canastra explicitamente, como mostrado na Figura 6.40 e Figura 6.41.



Figura 6.40 Evolução do ZINF nos casos Com e Sem Canastra, com ambos os casos executados com 50 iterações com a versão 31_centos

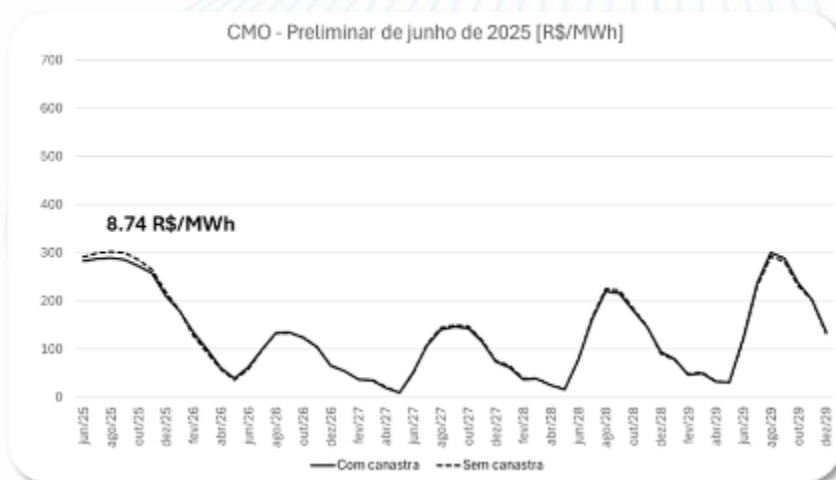


Figura 6.41 Comparação entre os CMOs obtidos ao longo do horizonte de estudo nos casos Com e Sem Canastra, com ambos os casos executados com 50 iterações com a versão 31_centos.

Ao observar os casos com todas as 11 sementes, verifica-se que os resultados dos casos com e sem Canastra (linhas contínuas e tracejadas) se aproximam de forma efetiva. Isso indica que o modelo se tornou mais robusto à entrada e saída de usinas hidrelétricas na configuração.

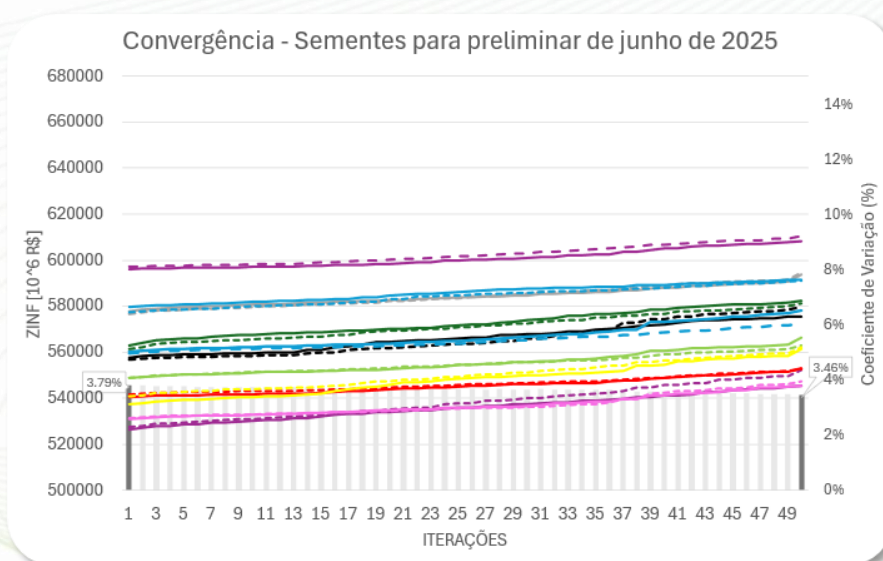


Figura 6.42 Valores de ZINF ao longo das iterações da PDDE, para diferentes sementes, para os casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra com a versão 31_centos.

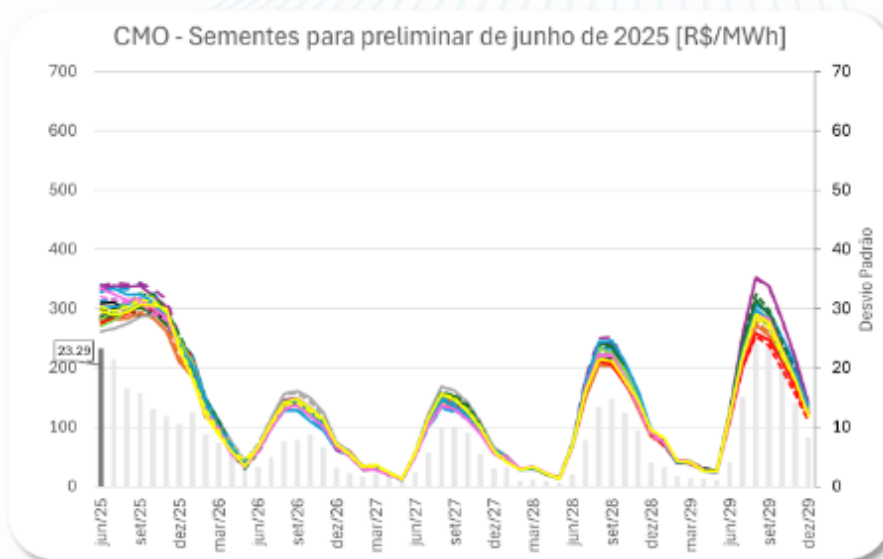


Figura 6.43 Valores de CMO nos 2.000 cenários da simulação final, para diferentes sementes, para os casos Com (linha cheia) e Sem (linha pontilhada) a UHE Canastra com a versão 31_centos.

De forma a evidenciar os resultados das Figura 6.42 e Figura 6.43, a Figura 6.44 mostra a ENA acumulada para os 12 primeiros meses de horizonte considerando todas as variações de semente testadas e considerando os casos com a sem a UHE Canastra (SC-PEE). Nota-se que os resultados para uma mesma semente são muito próximos com a UHE Canastra estando ou não no deck.

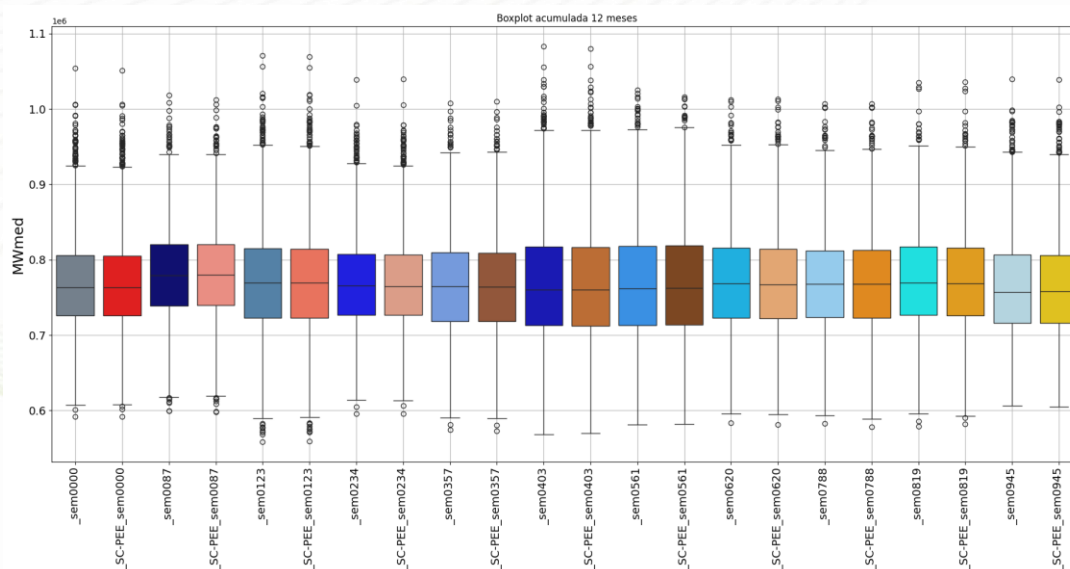


Figura 6.44 ENA acumulada no SIN referente aos cenários sintéticos dos primeiros 12 meses para o SIN utilizados na etapa backward da otimização considerando 50 iterações, 200 cenários por iteração e 20 realizações por estágio, totalizando 200 mil cenários. As diferentes cores indicam as diferentes sementes utilizadas, sendo que SC-PEE indica o caso sem a UHE Canastra.

6.14 Considerações

A análise feita nessa seção corrobora o fato de que a variação nos resultados obtidos no PMO de Junho, para o Newave híbrido, com e sem a UHE Canastra, não foi causado por alguma falha na modelagem da usina, seja nas suas características físicas ou no comportamento dos cenários gerados para ela. Observou-se, entretanto, que a entrada da usina causa uma mudança implícita no sorteio aleatório realizado para gerar os cenários para as usinas hidrelétricas, devido à entrada de um novo componente no vetor de afluições, e esse é o motivo das diferenças observadas. Na seção 6.12 mostra-se que, removendo esse efeito dos cenários, os resultados incluindo a usina são muito próximos dos resultados sem a usina. Este estudo originou a versão 31_centos do Newave com o mapeamento das sementes com base no posto de medição de vazão das usinas hidrelétricas. Esta versão trouxe uma maior robustez à entrada e saída de usinas hidrelétricas na configuração.

Análises adicionais modificando de forma explícita a semente mostraram que a variabilidade dos resultados ao se alterar a semente é maior do que a variabilidade ocorrida com a mudança implícita de semente ocorrida ao se incluir a UHE Canastra. Também se mostrou que a variabilidade dos resultados do NEWAVE com a semente, verificada na modelagem híbrida das usinas hidrelétricas, adotada a partir de 2025, já existia na modelagem a REE, utilizada até 2024.

Além disso, foi visto como que a parametrização CVaR afeta a variabilidade dos resultados. Ao atribuir maior peso à cauda da distribuição, observa-se uma tendência de aumento da variabilidade ao se trocar a semente. Isso pode ser atribuído, em princípio, ao fato de que o conjunto de cenários críticos é mais reduzido e, portanto, mais susceptível à variação amostral. Assim, pequenas alterações na cauda são amplificadas no cálculo dos cortes de Benders devido ao maior peso atribuído aos cenários mais críticos.

Mostrou-se também que, embora não eliminem o efeito da variação amostral, o aumento da quantidade de cenários backward e do número de iterações da PDDE torna os resultados do NEWAVE menos sensíveis à variação da semente.

Finalmente, na seção 6.13 mostrou-se uma solução mais imediata para contornar a questão da variabilidade amostral no modelo NEWAVE quando se adiciona ou remove uma usina na configuração, pelo fato de haver mudança nas sementes e, consequentemente, dos cenários backward para representação do problema estocástico e cenários forward para explorar a árvore, durante o algoritmo da PDDE. Esta alternativa requer mudanças de menor porte no modelo NEWAVE e não consistem em alterações na metodologia de resolução do problema.

Na seção seguinte, apresenta-se uma metodologia, em desenvolvimento pelo CEPEL, para tratar a questão da variabilidade amostral referente aos cenários backward de maneira estrutural, ou seja, buscando que os resultados do modelo NEWAVE sejam menos sensíveis à variação da semente utilizada para gerar os cenários.

6.15 SOLUÇÃO ESTRUTURAL: REAMOSTRAGEM DOS CENÁRIOS BACKWARD

Um aprimoramento que está sendo previsto, e tem sido objeto de pesquisa recente pelo CEPEL, consiste em uma estratégia de **reamostragem dos cenários backward**. Essa abordagem considera que a política ótima obtida pela PDDE não deveria estar dependente de um único conjunto discreto de cenários, uma vez que o problema real está associado a uma distribuição contínua de afluições e ventos.

A ideia central é aumentar a robustez da política com respeito a essa distribuição contínua. Dito de outra maneira, consideramos que obter a solução ótima para uma aproximação discreta não garante que a política esteja suficientemente bem construída para capturar a complexidade completa do processo contínuo. Assim, a reamostragem backward busca exatamente mitigar esse risco.

Apresentaremos a seguir uma descrição básica dessa metodologia, e alguns experimentos iniciais de sua aplicação. Ressaltamos, entretanto, que essa abordagem está ainda sendo analisada tanto do ponto de vista teórico, para que asseguremos consistência com as propriedades de convergência da PDDE, quanto do ponto de vista prático, de forma a garantir sua viabilidade prática na aplicação do NEWAVE.

A proposta envolve a construção sucessiva de diferentes discretizações das incertezas que definem a árvore backward, permitindo que a política resultante reflita uma visão mais abrangente do espaço amostral.

6.16 Procedimento proposto

Em linhas gerais, a extensão do algoritmo de PDDE incluindo a reamostragem backward envolve:

- 1) **Gerar** uma nova amostra de cenários **backward** com tamanho K ;
- 2) **Realizar** um passo **forward** com N cenários forward;
- 3) **Realizar** um passo **backward**, construindo os cortes de Benders;
- 4) **Realizar** um passo **forward** com um conjunto **reamostrado** de cenários forward também com tamanho N ;
- 5) **Reamostrar** os cenários **backward** com tamanho K e voltar ao passo (3).

Como o processo acima é realizado ao longo das iterações da PDDE, evita-se que a política seja construída a partir de um único conjunto amostral de cenários backward. Ressalta-se que, para que se garanta a convergência exata do método para o problema com árvore contínua, no limite quando o conjunto de cenários backward tende a infinito, a geração dos cenários deve incorporar conceitos de amostragem estratificada, para que, a cada amostra, possa-se ter uma representação equilibrada do espaço amostral das variáveis aleatórias. Com isso, assegura-se que os cortes gerados em cada iteração permaneçam válidos quando os novos cenários forem introduzidos, preservando as garantias teóricas de convergência ao problema contínuo.

6.17 Exemplo ilustrativo de resultados para um sistema hidrotérmico em cascata

A seguir é apresentado um exemplo prático para ilustrar a aplicação do algoritmo de reamostragem da backward descrito anteriormente e implementado em uma versão do modelo NEWAVE.

O experimento utiliza um sistema hidrotérmico em cascata composto por **7 usinas hidrelétricas** ao longo do rio São Francisco (Retiro Baixo, Queimado, Três Marias, Sobradinho, Itaparica, COMP-PAF-MOX e Xingó) e **8 usinas termelétricas**.



Figura 6.45 Exemplo – sistema hidrotérmico em cascata

O horizonte de planejamento é de **1 ano com 12 estágios**, com aflúências seguindo distribuição uniforme. Foram realizadas **20 iterações da PDDE**, com **200 cenários forward** por iteração, gerados via reamostragem.

A avaliação consiste em dois experimentos complementares, descritos a seguir.

6.17.1 Experimento 1- Comparação entre 2,4 e 6 cenários backward (com e sem reamostragem da backward)

Neste primeiro experimento, resolve-se o problema aumentando-se o número de cenários backward, para diferentes sementes. A Figura 6.46 compara o custo da solução ótima para cada cenário, entre a metodologia tradicional, onde o conjunto de cenários backward é fixo em todas as iterações da PDDE (gráficos à esquerda), com a metodologia proposta, onde os cenários backward são reamostrados em cada iteração.

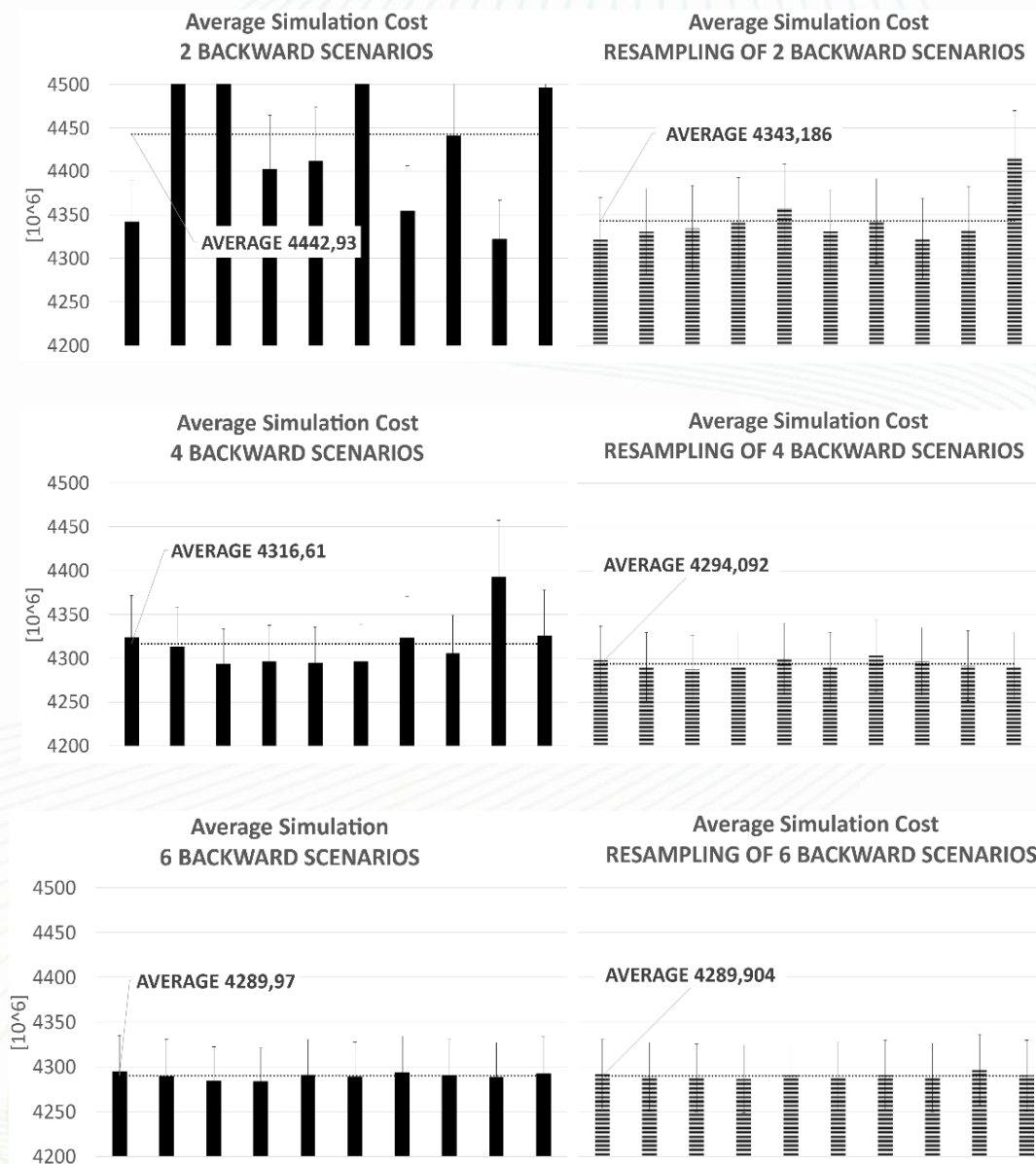


Figura 6.46 Custo médio de operação obtido na simulação final com 500 cenários (à esquerda: execução tradicional; à direita: versão com reamostragem dos cenários backward).

A Figura 6.47 mostra os resultados de evolução do ZINF em ambos os métodos, para todas as sementes.

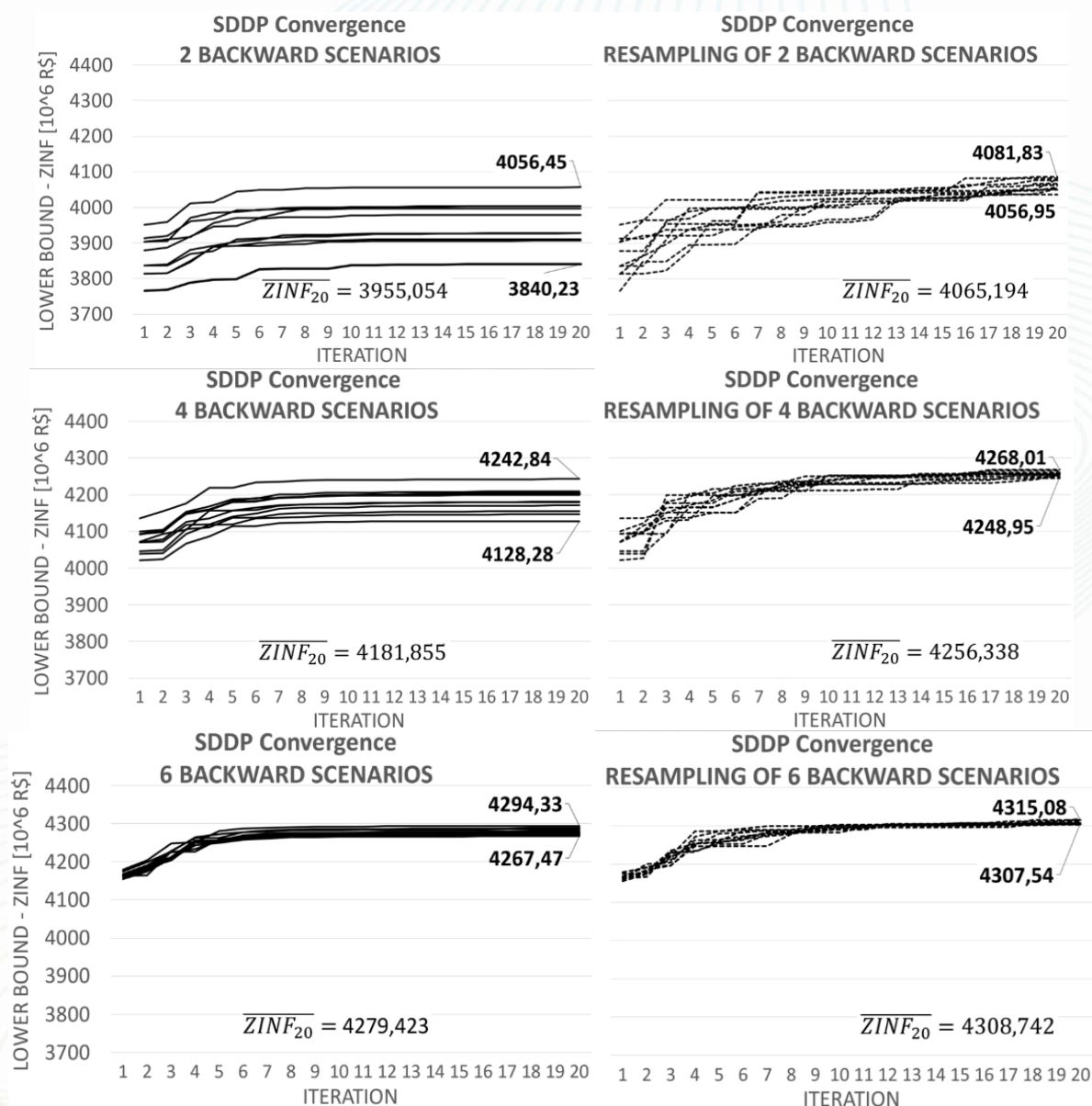


Figura 6.47 Evolução do ZINF ao longo das iterações da PDDE. (à esquerda: execução tradicional; à direita: versão com reamostragem dos cenários backward).

Tanto na abordagem tradicional como na proposta, observa-se que, conforme o número de cenários backward aumenta, há uma redução da variabilidade tanto dos custos médios de operação (COPER) quanto do valor do limite inferior (ZINF) entre as sementes, indicando uma maior robustez da política. Entretanto, na abordagem tradicional da PDDE essa estabilidade é obtida a custo de um maior tempo computacional, enquanto na abordagem proposta este ganho de robustez é alcançado **sem aumento do tempo de CPU**, uma vez que os resultados com 4 cenários backward, na modelagem proposta, possuem estabilidade semelhante aos da abordagem tradicional com 6 cenários backward.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

6.17.2 Experimento 2 - Avaliação ampliada: ZINF, COPER e tempo de processamento

O segundo experimento amplia a análise ao considerar um conjunto maior de configurações, variando-se a quantidade de cenários backward entre 2 e 12 por iteração. Os resultados são comparados com os obtidos com 20 cenários backward, que é tomado como referência.

A análise do ZINF (Figura 6.48) indica que na 100ª iteração começa-se a ter maior estabilidade de resultados a medida que o número de cenários backward aumenta, reduzindo possíveis variabilidades e indicando políticas mais consistentes. No entanto, a metodologia com reamostragem dos cenários backward consegue reproduzir essa estabilidade mais rapidamente: utilizando apenas 6 cenários backward por iteração, foi possível obter valores de ZINF semelhantes aos produzidos por execuções com 10 a 12 cenários tradicionais.

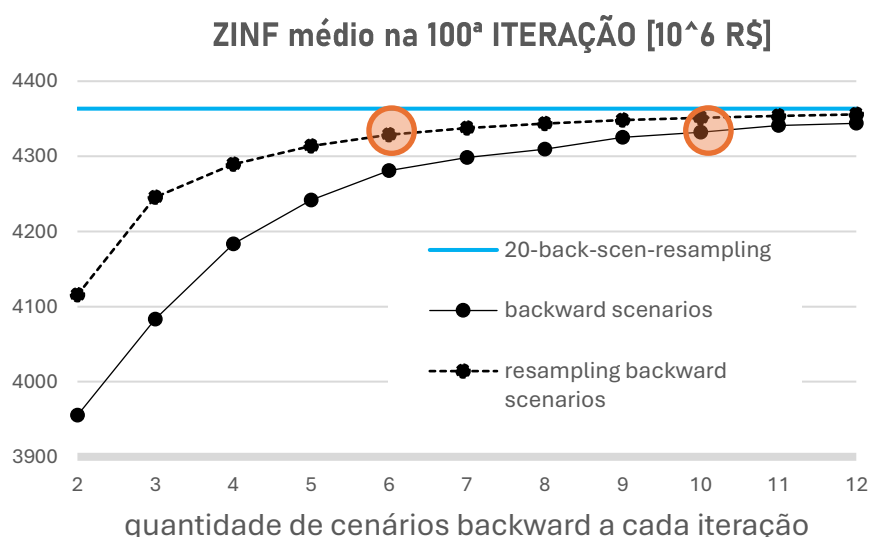


Figura 6.48 ZINF da centésima iteração em função da quantidade de cenários backward por iteração.

Quanto ao custo médio de operação obtido com uma simulação final contendo 500 cenários (Figura 6.49), o comportamento é análogo ao observado para o ZINF: o aumento na quantidade de cenários backward reduz a variabilidade dos resultados, mas a reamostragem backward alcança praticamente o mesmo nível de estabilidade utilizando uma configuração com menos cenários por iteração.

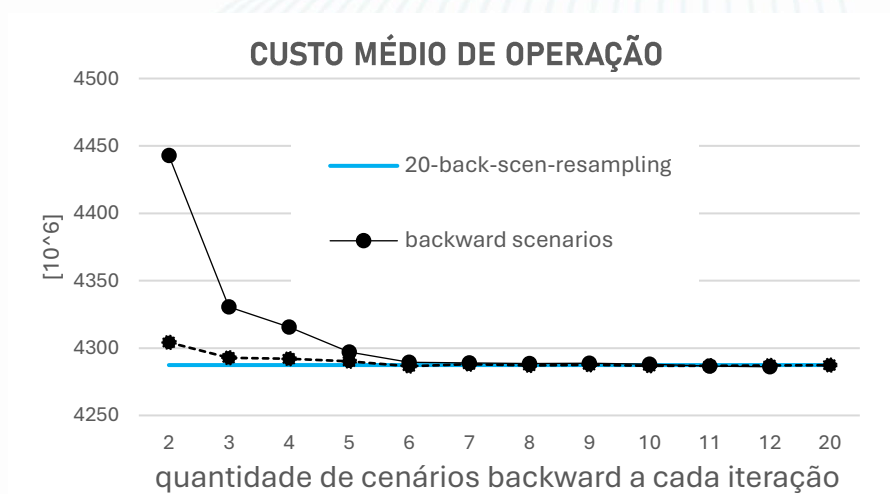


Figura 6.49 Custo médio de operação obtido na simulação final com 500 cenários.

Por fim, a Figura 6.50 evidencia um dos principais benefícios da reamostragem da backward em termos práticos, um ganho de eficiência do processamento da ordem de 20% a 25% permitindo obter políticas mais robustas sem aumento do custo computacional.

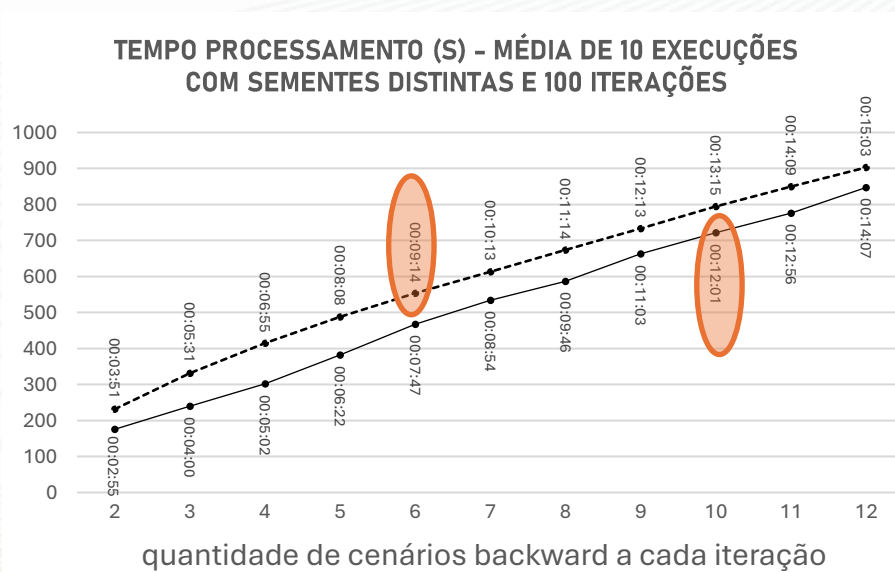


Figura 6.50 Tempo médio de CPU em função da quantidade de cenários backward em cada iteração.

Em resumo, os resultados dos experimento 2 mostram que a reamostragem backward permite atingir níveis de robustez comparáveis aos obtidos com um número elevado de cenários backward, porém com custo de processamento substancialmente menor. Trata-se, portanto, de uma alternativa promissora para melhorar a qualidade das políticas operativas para os casos de mais grande porte com os do sistema interligado nacional (SIN).

Por fim, destacamos que os resultados obtidos para o sistema hidrotérmico em cascata reforçam o objetivo de aumentar a robustez da PDDE em relação ao conjunto de cenários utilizados no passo backward. A abordagem proposta apresentou resultados significativamente mais estáveis quando comparada ao método tradicional, reduzindo a dependência da política em relação à semente aleatória utilizada para gerar os cenários backward. Esses experimentos indicam que a técnica tem forte potencial para aprimorar a construção das políticas operativas no NEWAVE.

Do ponto de vista conceitual, esse trabalho encontra-se em processo de revisão [18] e, do ponto de vista prático, estamos trabalhando no desenvolvimento da estratégia de estratificação que permitirá atender à premissa de convergência discutida no artigo mencionado.

7. CONCLUSÕES

Este relatório avaliou o comportamento observado no modelo NEWAVE para o deck preliminar do PMO de Junho/2025 onde a inclusão, na configuração do problema, de uma pequena usina a fio d'água e isolada na cascata (UHE Canastra) causou uma variação não esperada nos custos marginais de operação (CMOs) médios obtidos na simulação final do modelo. Os seguintes aspectos foram avaliados: (i) modelagem das características físicas e dos cenários da UHE Canastra no problema de otimização; (ii) verificação dos resultados uniformizando a quantidade de iterações do algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), aplicado para resolver o problema do NEWAVE; (iii) comportamento dos casos em relação a variações dos parâmetros da PDDE; (iv) análise de sensibilidade dos resultados variando a semente utilizada para geração dos cenários; (v) comparação entre os resultados obtidos com a modelagem individualizada e a REE, variando a semente; (vi) comparação entre os resultados com e sem a metodologia de aversão ao risco CVaR.

As principais conclusões obtidas da análise foram as seguintes:

- não foram identificadas particularidades ou algum comportamento anômalo na modelagem da UHE Canastra, seja em relação a suas características físicas (função de produção) ou cenários de aflúências, que justificasse o comportamento observado no caso;
- as diferenças entre os casos Com e Sem a UHE Canastra reduziram ao se uniformizar a quantidade de iterações, mas não em uma magnitude que fosse esperada, dada a pequena variação entre as configurações dos dois casos;
- os resultados dos casos se aproximam ao se aumentar os parâmetros para representar o problema (número de cenários backward) e os parâmetros da PDDE (número de cenários forward e quantidade de iterações), porém as diferenças continuam acima do esperado;

Dando sequência a análise, verificou-se que o motivo maior das diferenças é a **variação amostral**, que ocorre de forma implícita quando se inclui a UHE Canastra na modelagem individualizada. Isso foi corroborado por dois tipos de análises:

- avaliação dos resultados ao se variar a semente, onde se verificou que as diferenças entre os casos com a mesma configuração (com UHE ou sem a UHE) são maiores do que as diferenças para a mesma semente, porém incluindo ou não a UHE Canastra na configuração;
- comparação entre os resultados com e sem a UHE Canastra, removendo a mudança implícita da semente, onde se verificou que os resultados com e sem a UHE Canastra ficaram muito próximos;

Finalmente, verificou-se que a variação amostral também ocorre com a modelagem a reservatórios equivalentes de energia (REE), ao se variar a semente.

7.1 Propostas para tratar a variabilidade de resultados do NEWAVE

As análises realizadas ao longo deste relatório já indicam que, com os parâmetros atuais utilizados na PDDE (20 cenários backward, 200 cenários forward e número máximo de 50 iterações), há

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

uma variabilidade dos resultados do NEWAVE ao se alterar a semente utilizada para a geração de cenários. Essa sensibilidade já estava presente na modelagem a REE e permanece na modelagem a usinas individualizadas. Embora a fixação da semente faça com que os resultados não variem de uma rodada para outra de um mesmo caso (por exemplo, utilizando diferentes máquinas ou números de processadores), algumas mudanças no deck, como por exemplo a entrada de uma nova usina hidrelétrica, podem causar “mudanças implícitas” na semente.

De forma a tratar os efeitos da variabilidade amostral, são propostas neste relatório, em um primeiro momento, três alternativas descritas a seguir.

7.1.1 Versão do modelo NEWAVE com sementes fixas independente da entrada e saída de usinas hidrelétricas

Uma alternativa de implementação mais imediata, descrita na seção 6.13, consiste em **gerar uma quantidade de sementes equivalente à capacidade máxima de postos definida no caso**, para garantir que a entrada ou saída de usinas hidrelétricas não altere os ruídos utilizados na geração de cenários.

Adicionalmente, foi **alterado o mapeamento de atribuição de sementes**, que passou a ser feito por posto de vazão, assegurando que cada usina permaneça associada à mesma semente, independentemente de alterações nos dados de entrada, como a troca de ordem de definição no arquivo de cadastro das UHEs (confhd.dat). Com isso, os ruídos gerados para cada usina permanecem fixos, mesmo diante da inclusão, remoção ou mudança de ordenação das usinas na configuração.

Esta versão já foi disponibilizada aos agentes e passou pela validação da **FT-NEWAVE**, que confirmou sua estabilidade, compatibilidade com a cadeia de modelos e ausência de impactos nos estudos agregados da EPE. Com isso, a FT-NEWAVE recomendou a substituição da versão 30.0.4 pela **versão 31_centos**.

A ANEEL abriu a **TS 022/2025** para a homologação da versão 31_centos nos processos de PMO e PLD. O período para envio de contribuições é de **19/11/2025 a 18/12/2025**, visando obter subsídios para sua validação no planejamento e na operação do SIN e no cálculo do PLD.

7.1.2 Aplicação de funcionalidades já disponíveis no NEWAVE e seu potencial para viabilizar reparametrizações da PDDE

Ao longo das versões mais recentes do NEWAVE, foram disponibilizadas diversas funcionalidades e avanços na estrutura computacional voltadas à redução do tempo computacional e ao aprimoramento do uso de memória. Esses aprimoramentos têm potencial para viabilizar avanços e reparametrizações mais ambiciosas nos parâmetros da PDDE, discutidos na seção 6, permitindo considerar valores maiores para o número de cenários backward, séries forward e iterações, sem comprometer a viabilidade computacional do processo.

Entre as funcionalidades já disponíveis, destacam-se:

- Integração com solvers mais eficientes e robustos, como o Gurobi e o CPLEX, que reduzem significativamente o tempo de execução dos casos;

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

Cliente: ONS

- eliminação de cortes de Benders;
- redução de hiperplanos semelhantes da FPHA;
- Seleção de cortes em todas as etapas do modelo;
- Uso de cortes externos para o período de pós-estudo;
- infraestruturas mais avançadas de computação de alto desempenho e gerenciamento de memória;

Alguns desses benefícios já foram mostrados para o caso em análise, mostrados na seção 6.10, como o aumento na quantidade de cenários forward, e aumento na quantidade de cenários backward.

7.1.3 Aplicação da metodologia de reamostragem dos cenários backward

Uma alternativa de implementação em um prazo mais longo consiste em um aprimoramento na metodologia da PDDE associado à reamostragem dos cenários backward a cada iteração do algoritmo, de forma a fazer com que os conjuntos de cenários fiquem menos sensíveis à escolha da semente. Esta metodologia, descrita na seção 6.15, idealmente deve observar algumas condições para aplicabilidade de forma exata na PDDE, porém uma variante heurística pode produzir os resultados de estabilidade já desejados. A aplicação desta técnica em um exemplo ilustrativo apresentou resultados satisfatórios, e, no momento, o CEPEL está trabalhando na aplicação da metodologia para o caso real brasileiro, de grande porte.

7.2 Investigações adicionais

Como análises adicionais, a serem realizadas no futuro, citam-se:

7.2.1 Avaliação mais ampla dos efeitos da variação dos parâmetros para caracterização do problema e da estratégia de PDDE

Neste relatório foi apresentada uma análise de sensibilidade, na estabilidade dos resultados do NEWAVE, quanto à quantidade de cenários backward para representação do problema estocástico, assim como da quantidade de séries forward e número de iterações da PDDE, para os casos Com e Sem a UHE Canastra estudados neste relatório. Entretanto, entendemos que esta análise precisa ser estendida para um conjunto bem maior de casos, e possivelmente ser realizada em conjunto com as instituições que validam os modelos (ONS, CCEE e EPE) e contando com participação dos agentes.

Uma primeira linha de ação consiste em avaliar ajustes nos principais parâmetros da PDDE (número de cenários backward, número de séries forward e quantidade de iterações) com objetivo de aumentar a robustez dos resultados do NEWAVE em relação à variação amostral. Esses ajustes podem envolver incrementos ou reparametrizações, a depender dos benefícios observados nos testes, que podem reduzir a variabilidade e melhorar a estabilidade da política obtida.

Entre os pontos a serem analisados, destacam-se:

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

- **Utilização de amostragem seletiva nos cenários forward da PDDE:** esta análise é motivada pela mudança sensível observada no limite inferior (ZINF) na primeira iteração, nas análises de sensibilidade realizadas neste relatório aumentando a quantidade de cenários forward;
- **Utilização de amostragem aleatória simples também na primeira iteração,** em substituição à amostragem seletiva tradicional. Essa análise permitirá avaliar, principalmente, o impacto na representatividade dos cenários utilizados no primeiro estágio, que oficialmente permanecem fixos ao longo do processo iterativo, além de possibilitar investigações adicionais sobre o comportamento inicial da política.
- **Execução da reamostragem PDDE sem a fixação dos cenários do primeiro mês,** permitindo que o algoritmo utilize o **nó zero** no processo de construção da política. Essa abordagem altera a forma como o problema considera o início do horizonte e, ao trazer mais representatividade da incerteza relacionada as vazões no primeiro estágio, será possível avaliar os benefícios desse maior detalhamento.
- **Avaliação de diferentes estratégias para geração de séries forward,** incluindo tanto aquelas obtidas diretamente da própria árvore de discretização utilizada na backward quanto séries “out-of-sample”. Essa análise permitirá comparar os efeitos de maior coerência entre os processos backward-forward com os potenciais ganhos de representatividade que trajetórias alternativas podem proporcionar.

Essas análises permitirão fundamentar tecnicamente quais reparametrizações são mais eficazes para melhorar a estabilidade dos resultados, equilibrando qualidade estatística e custo computacional.

7.2.2 Extensão da análise para o programa GEVAZP, que gera cenários para o DECOMP

É necessário estender a análise feita no NEWAVE para os cenários gerados pelo modelo GEVAZP, que gera os cenários de vazão utilizados no modelo DECOMP. Da mesma forma como foi feita a análise para o NEWAVE, devem ser analisadas as consequências de adicionar ou retirar uma usina na geração de cenários do GEVAZP e nos resultados da operação do modelo DECOMP.

7.2.3 Avaliação da estratégia de amostragem dos ruídos que compõe os cenários de aflúências e velocidades de vento

Propõe-se uma avaliação da estratégia atualmente utilizada para a amostragem, com foco em reduzir a sensibilidade dos cenários à semente empregada. O processo de amostragem seletiva, que leva em consideração métricas de distância em seu subprocesso de agregação, pode ser complementado ou revisado de forma a torná-lo mais robusto à semente utilizada para o sorteio de cenários, principalmente considerando o novo contexto de geração de cenários para todas as usinas hidrelétricas do sistema e não mais de forma agregada por REE.

Pode-se avaliar alternativas que reduzam a sensibilidade como:

- **aprimoramentos na métrica para cálculo das distâncias** utilizada para comparar cenários no processo de agregação;
- **alternativas ao método de clusterização**, com técnicas de amostragem como o hipercubo latino, em substituição ao método de k-means;
- Investigação de **alternativas de amostragem estratificada**.

O objetivo é identificar abordagens que tornem o processo menos dependente da semente, contribuindo para maior robustez dos cenários utilizados na PDDE.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. L. Diniz e M. E. Maceira, "A Four-Dimensional Model of Hydro Generation for the Short-Term Hydrothermal Dispatch Problem Considering Head and Spillage Effects," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, nº 3, pp. 1298-1308, 2008.
- [2] A. L. Diniz, L. A. Terry, L. C. Sousa e M. E. Maceira, "Modelagem da função de produção das usinas hidroelétricas no modelo DESSEM," Relatório Técnico CEPEL 926/05, revisão 2, 2010.
- [3] F. Treistman, M. E. Maceira e J. M. Damazio, "Proposta Metodológica para o Aprimoramento da Memória de Modelos Auto-Regressivos Periódicos," Relatório Técnico CEPEL no 1416/2020, 2020.
- [4] M. V. F. Pereira e L. M. V. G. Pinto, "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning," *Mathematical Programming*, vol. 52, nº 1-3, pp. 359-375, 1991.
- [5] M. E. Maceira, D. D. Penna, A. L. Diniz, R. J. Pinto, A. C. G. de Melo, C. L. V. Vasconcellos e 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," em *20th PSCC - Power Systems Computation Conference*, Dublin, 2018.
- [6] M. E. P. Maceira, C. B. Cruz, J. M. Damazio, A. C. G. Melo, A. L. Diniz e F. Treistman, "Consideração do Modelo Auto-Regressivo Periódico Anual (PAR(p)-A) no Algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica," Relatório Técnico CEPEL no 2002/2020, 2020.
- [7] A. L. Diniz e C. B. Cruz, "Revisão da construção dos cortes de Benders ao considerar o Modelo Autorregressivo Periódico Anual (PAR(p)-A) no Algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica," Relatório Técnico CEPEL 1941/2021, 2021.
- [8] V. Andrade Almeida, J. F. Moreira Pessanha e C. Barbosa da Cruz Oliveira, "Nota Técnica 2751 - Representação de Postos Hidrológicos Especiais no Modelo NEWAVE Híbrido," Cepel, Rio de Janeiro, 2022.
- [9] CPAMP - Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico, "Modelo PAR(p)-A de Representação Hidrológica e Avaliação da Parametrização do CVaR – Ciclo 2021/2022," Relatório Técnico nº 01-2022, 2022.
- [10] C. B. Cruz, A. L. Diniz e R. Barboza, "Avaliação da diferença de resultados do modelo NEWAVE em função da informação de geração térmica mínima das usinas GNL no primeiro mês," 2024.
- [11] C. B. Cruz, A. L. Diniz, T. C. Justino e R. R. Barboza, "Representação de usinas hidrelétricas individualmente e de forma agregada na programação dinâmica dual estocástica - NEWAVE Híbrido," Relatório Técnico CEPEL 1002/2022, 2022.
- [12] CPAMP - Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico, "Representação híbrida de usinas hidrelétricas e efficientização do modelo NEWAVE," Relatório Técnico 01/2023, 2023.
- [13] P. D. A. S. L. C. C. Lira, "Strategies for an Efficient Representation of the Piecewise Linear Approximation of the Hydropower Production Function in Long-Term Operation Planning - 8th International Conference on Hydropower Scheduling in Competitive Electricity Markets," 2025.
- [14] CEPEL, "Estratégia de seleção de cortes de Benders para redução do tempo computacional da Programação Dinâmica Dual Estocástica - Aplicação ao Modelo Newave - Relatório Técnico CEPEL 11138/2017," 2017.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL www.cepel.br

Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200

Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21941-971 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

- [15] CEPEL, "Eliminação de Cortes de Benders Redundantes da Função de Custo Futuro do modelo NEWAVE - Relatório Técnico CEPEL 3994/2024," 2024.
- [16] CEPEL, "Nota Técnica no 66 - Mecanismos Alternativos de Aversão a Risco - Valor Condicionado a um Dado Risco," 2013.
- [17] M. E. Maceira, L. G. B. Marzano, D. D. J. Penna, A. L. Diniz e T. C. Justino, "Application of CVaR risk aversion approach in the expansion and operation planning and for setting the spot price in the Brazilian hydrothermal interconnected system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 72, pp. 126-135, 2015.
- [18] C. B. Cruz, A. L. Diniz e L. Bahiense, "Backward resampling in stochastic dual dynamic programming: application to power generation planning," *European Journal of Operational Research*, under review.

© Todos os direitos reservados ao CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. É vedada a reprodução, modificação, edição, distribuição ou qualquer forma de utilização deste material, no todo ou em parte, inclusive no que se refere a direitos de propriedade intelectual.

Os modelos, softwares e documentos técnicos citados neste relatório possuem caráter estritamente técnico e informativo, tendo por finalidade apoiar análises e simulações no setor elétrico. Todos os modelos mencionados são submetidos a processos de homologação conduzidos por instituições setoriais competentes antes de sua disponibilização para uso geral.

Os resultados apresentados devem ser interpretados considerando as premissas, os dados e as configurações adotadas no momento da elaboração deste estudo. Qualquer extrapolação, reprodução ou aplicação desses resultados em contextos distintos deverá ser realizada com critério técnico pelo usuário, que será o único responsável por garantir a adequação às finalidades específicas de uso.

O CEPEL não se responsabiliza por quaisquer decisões operativas ou comerciais adotadas com base exclusiva neste relatório.

Os modelos e ferramentas técnicas evoluem continuamente, podendo sofrer alterações decorrentes de melhorias, avanços metodológicos, exigências regulatórias ou atualizações operacionais.

Em caso de dúvidas ou mais esclarecimentos, por favor contacte a equipe do CEPEL pelo endereço cepel@cepel.br.