

Título: Análise da Sinalização de Valor da Água Elevado no Reservatório Equivalente de Energia Nordeste no PMO de Junho de 2024 pelo Modelo NEWAVE

Nº de Páginas: 25

Nº de Anexos: 0

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

Departamento: Departamento de Sistemas Eletroenergéticos

Nº do PEP: CPCT.ONOE00.790.004

Centro de Lucro: C250000101

Centro de Custo: C205000021

Resumo: Esta Nota Técnica apresenta a análise realizada pelo CEPEL sobre o elevado valor da água obtido pelo modelo NEWAVE para o Reservatório Equivalente de Energia (REE) Nordeste (NE) nos primeiros meses do Programa Mensal da Operação (PMO) de Junho de 2024, e sua relação com as restrições operativas hidráulicas que são impostas para esse REE ao longo do horizonte de estudo do NEWAVE. Avalia-se também, do ponto de vista quantitativo, a magnitude do valor da água obtido.

Autores:

Cristiane Barboza da Cruz

Robério da Rocha Barboza

André Luiz Diniz Souto Lima

Palavras-Chave:

VALOR DA ÁGUA, PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO, RESTRIÇÕES HIDRAÚLICAS

Classificação de acesso:

Público Interno Setorial Confidencial

Aprovação e data de emissão

Flávio Rodrigo de Miranda Alves
Chefe do Departamento de Sistemas Eletroenergéticos

Tel.: (21) 2598-6258

E-mail: frma@cepel.br

Aprovação e data de emissão

Mauricio Barreto Lisboa
Diretor de Tecnologia

ÍNDICE

SUMÁRIO EXECUTIVO	2
1 INTRODUÇÃO	3
2 ANÁLISE PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO DOS RESULTADOS	3
3 ANÁLISE DO VALOR DA ÁGUA E RESTRIÇÕES HIDRÁULICAS	5
4 RELAÇÃO ENTRE VALORES DA ÁGUA E VIOLAÇÃO DE RESTRIÇÕES	12
5 ANÁLISE DA OPERAÇÃO DO REE NORDESTE	17
6 CONCLUSÕES	24
7 REFERÊNCIAS	25

SUMÁRIO EXECUTIVO

Este documento apresenta a análise, realizada pelo CEPEL, com objetivo de justificar o valor elevado da água no reservatório equivalente de energia (REE) do Nordeste (NE) observado no modelo NEWAVE, para o PMO de Junho de 2024.

Motivação: Durante a execução do modelo DESSEM para o despacho semi-horário e formação do preço horário (PLD) para o dia 28 de junho de 2024, observou-se um pico de custo marginal de operação (CMO) nos resultados do modelo DESSEM. Após uma análise prévia dessa ocorrência pelo ONS, verificou-se que houve um valor da água muito elevado para o Reservatório Equivalente de Energia (REE) Nordeste na função de custo futuro (FCF) do modelo NEWAVE, obtida no Programa Mensal de Operação (PMO) de Junho de 2024. Como, para efeito de uso no DESSEM, o principal resultado do modelo NEWAVE é a FCF, transmitida para o modelo DECOMP, que irá refiná-la por reservatório para transmitir posteriormente ao modelo DESSEM, torna-se fundamental a análise da justificativa para este valor da água elevado no modelo NEWAVE.

Metodologia: Inicialmente, fez-se uma análise preliminar do comportamento dos resultados do modelo NEWAVE no PMO de Junho de 2024. Verificou-se, de imediato, um aumento progressivo no valor da água do REE Nordeste ao longo do horizonte de estudo, quando se caminha no sentido contrário do tempo, ou seja, do final para o início do horizonte de estudo. Constatou-se também que, nas primeiras iterações da técnica de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), utilizada para resolver o problema do modelo NEWAVE, houve valores da água ainda mais elevados, fruto das decisões operativas para os reservatórios tomadas no início do algoritmo. Uma análise de sensibilidade inicial mostrou que este valor da água elevado está diretamente relacionado às restrições de vazão mínima impostas no modelo NEWAVE para o REE NE, e que as retiradas de água para outros usos também contribuem para esse valor, embora em menor escala. Ao aprofundar a análise, verificou-se que uma relaxação na magnitude dessas restrições contribui para uma redução efetiva no valor da água do REE NE. Outra observação feita nesta análise inicial foi que, embora uma redução artificial da demanda líquida no submercado NE para emular um excesso de geração eólica contribua para a redução do valor da água no REE NE, este efeito é limitado, pois a geração eólica não está diretamente relacionada ao atendimento das restrições hidráulicas. Na sequência, analisou-se o processo de formação do valor elevado da água para os primeiros períodos do estudo, com base em um estudo ilustrativo da construção dos cortes de Benders ao longo dos estágios do horizonte de estudo. Posteriormente, foram feitas análises do comportamento cíclico dos valores da água e atendimento das restrições hidráulicas tanto nos períodos úmidos como nos períodos secos, para anos mais afastados do início do horizonte de estudo, e avaliou-se também o atendimento às restrições hidráulicas e valores da água para os dois primeiros anos.

Resultados: Uma das principais conclusões do estudo é que os valores elevados da água do REE NE no modelo NEWAVE não são contraditórios ao pequeno número de violações verificadas na simulação final, mas até o justifica, pois o valor da água elevado ocorre justamente para que possa promover uma redução nestas violações. O estudo mostrou também, de forma ilustrativa, o efeito da acumulação do cálculo do valor da água, considerando os percentuais de violação ocorridos na segunda iteração da PDDE. Embora o cálculo seja bastante aproximado, o valor obtido é coerente com os valores elevados da água para o REE Nordeste em julho de 24. Verificou-se também que a situação de atendimento às restrições operativas é bem mais crítica nos dois primeiros anos quando comparada com os demais anos, o que justifica a redução progressiva do valor da água quando se caminha para o final do horizonte de estudo. Como conclusão adicional da análise, observa-se que este valor da água elevado no REE Nordeste impacta o chamado "custo marginal de geração hidráulica" (CMH) nos modelos DECOMP e DESSEM e, caso estes modelos necessitem ativar a geração hidráulica no NE além do mínimo exigido para atender às restrições de vazão mínima, haverá um aumento no CMO. Embora análises mais específicas sejam

necessárias no modelo DESSEM, este aumento no valor da água do REE NE contribui, do ponto de vista conceitual, para o aumento de CMO no modelo DESSEM em determinadas horas do dia com carga mais elevada, onde há uma necessidade maior de potência e que existe o despacho de fontes de geração com custo marginal de geração mais elevado.

1 INTRODUÇÃO

Este documento apresenta a análise realizada pelo CEPEL, envolvendo apenas o modelo NEWAVE, da ocorrência de pico de CMO no DESSEM no dia 28 de junho de 2024. Após uma avaliação prévia, pelo ONS, do resultado dos três modelos, foi solicitado que o CEPEL (vide seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) realizasse uma análise de forma a explicar o valor da água elevado sinalizado pelo modelo NEWAVE para o reservatório equivalente de energia (REE) Nordeste. As análises estão apresentadas nas seções 2 e 3 do documento e apresenta-se, na seção 6, as conclusões obtidas com base na análise realizada até então.

2 ANÁLISE PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO DOS RESULTADOS

Inicialmente, o modelo NEWAVE foi executado de forma a reproduzir os resultados verificados pelo ONS em relação ao REE Nordeste. A Figura 2.1 mostra as usinas que pertencem a esse REE, indicando, a esquerda, o número de cadastro, usina de jusante e volume armazenado inicial. À direita na mesma figura, mostra-se a topologia dos reservatórios do REE, observando-se que o REE Nordeste se acopla, a montante, com o REE Sudeste, por meio da modelagem de usinas fictícias.

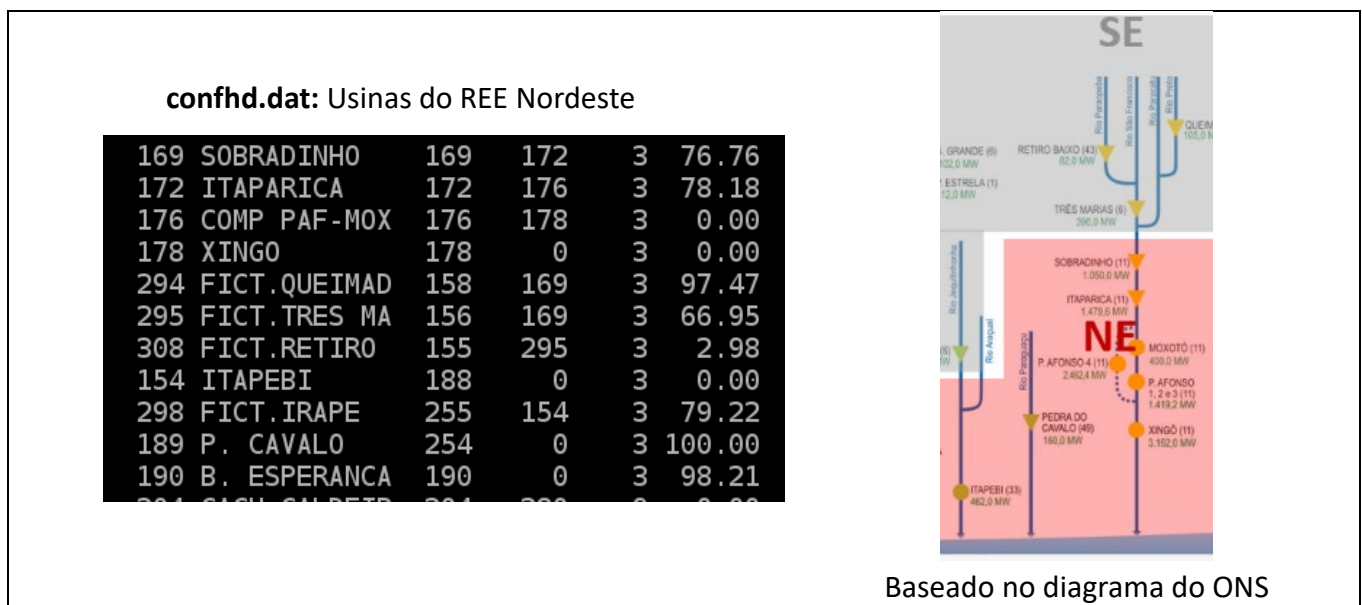


Figura 2.1 – Submercado e Reservatório Equivalente de Energia Nordeste.

Com o objetivo de verificar os valores elevados da água no REE NE, mencionados no e-mail do ONS, foram impressas as médias dos valores da água gerados pelo programa auxiliar NWLISTOP¹, onde se observa que a média dos valores da água no início do horizonte apresenta-se elevada. É interessante

¹ O NWLISTOP é um programa utilitário desenvolvido pelo CEPEL para análise dos resultados mais detalhados nos cenários do NEWAVE, e que acompanha a instalação do modelo.

notar a tendência de redução dos valores da água à medida que se caminha para o final do horizonte, uma vez que há menos estágios para atendimento às diversas restrições do problema, como será analisado posteriormente no documento.

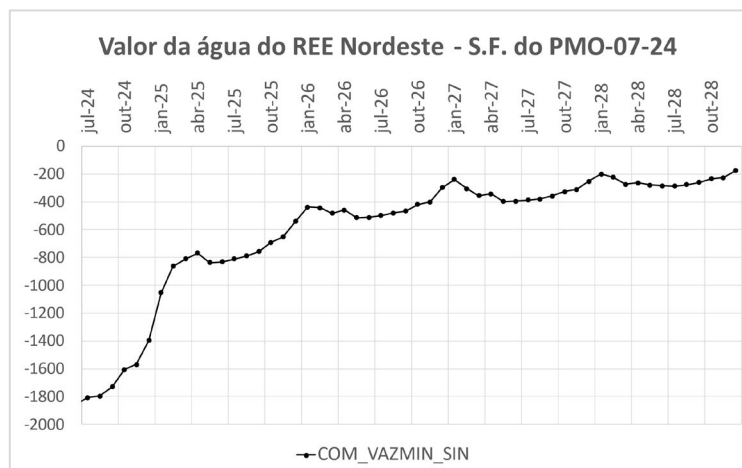


Figura 2.2 – Média dos valores da água do Nordeste (R\$/MWh), em cada período, considerando os cenários da simulação final, ao longo do horizonte de estudo.

Apresentamos a seguir, na Figura 2.3, a distribuição dos valores da água para o mês de agosto de 2024, nas duas primeiras iterações da PDDE², a serem utilizados para construção dos cortes do mês de acoplamento do DECOMP (julho de 2024), onde se observam, novamente, valores elevados da água do REE Nordeste. Embora não interfira no resultado da análise, destaca-se também a diferença nítida entre os valores da água construídos na segunda iteração do cálculo da política (cortes de 201 a 400) e os da primeira iteração (entre os números 0 e 200), na qual o modelo realiza um processo de discretização do espaço de estados³, ao invés da obtenção dos estados a partir dos resultados da simulação *forward* [1], como nas iterações seguintes. Observa-se que, em função da discretização do domínio das variáveis de estado nessa primeira iteração da PDDE, também se constroem cortes para as faixas de armazenamentos mais altas, que apresentam valores da água mais próximos de zero devido à maior quantidade de energia hidráulica disponível.

² A PDDE, Programação Dinâmica Dual Estocástica [8] [6], é a técnica empregada para resolução do problema do NEWAVE, considerando modelos autorregressivos periódicos [7] para as afluências. Para detalhes, consulte [1].

³ Esta primeira iteração, onde se diversifica a exploração dos estados do problema, é um dos vários aspectos que diferenciam o modelo NEWAVE em relação a outros trabalhos na literatura e aplicações que utilizam PDDE.

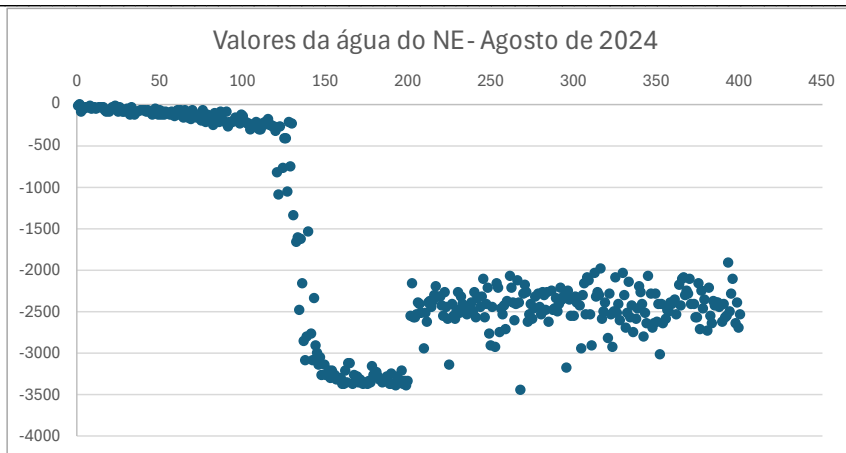


Figura 2.3 – Distribuição dos coeficientes dos cortes de Benders construídos nas duas primeiras iterações da PDDE.

Com o objetivo de destacar a diferença nos valores obtidos, apresentamos, à direita da Figura 2.4, um gráfico *boxplot* com os valores da água construídos pelas duas iterações e, à esquerda, os cortes construídos apenas na segunda iteração.

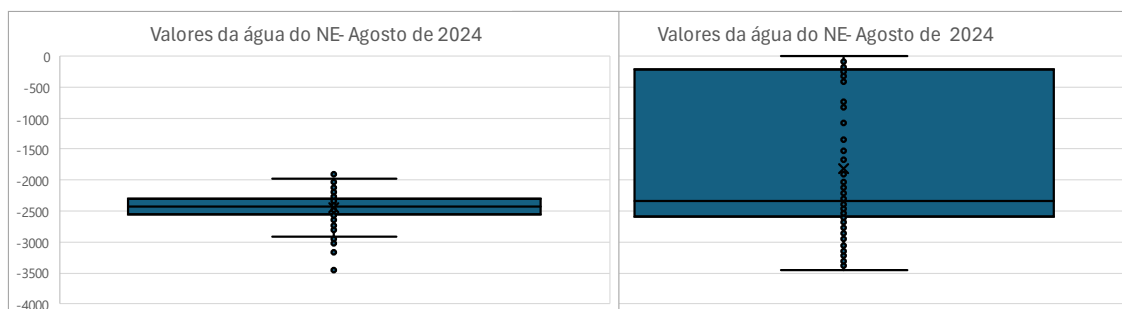


Figura 2.4 – Boxplot com coeficientes dos cortes de Benders associados ao armazenamento do REE Nordeste na segunda iteração (esquerda) e duas primeiras iterações (direita).

3 ANÁLISE DO VALOR DA ÁGUA E RESTRIÇÕES HIDRÁULICAS

Destacamos um ponto importante que pode ter sido o principal fator motivador da inicial falta de entendimento dos resultados: os valores da água elevados do REE Nordeste, mesmo quando sua demanda líquida é negativa durante o horizonte de planejamento. Isso sugere que, mesmo não tendo demanda do submercado em questão a ser atendida, o problema possa apresentar ainda uma série de restrições hidráulicas a serem atendidas, como, por exemplo, a meta de retirada de água para outros usos, e restrições de vazão (defluência) mínima. Assim, o recurso hidráulico disponível no REE Nordeste estaria sendo utilizado potencialmente para o atendimento do seu conjunto de restrições hidráulicas.

Neste sentido, após realizar uma análise do processo de construção dos valores da água na etapa *backward*, o CEPEL realizou uma análise mais aprofundada das restrições hidráulicas no modelo NEWAVE, para o REE Nordeste. Observou-se, assim que estes valores da água elevado estão significativamente

associados às violações de restrições hidráulicas, especialmente a de vazão mínima e retirada de água para outros usos, como explicado com mais detalhes a seguir.

3.1 Análise das restrições hidráulicas no REE Nordeste

De forma a complementar a avaliação mais analítica apresentada anteriormente, faremos agora uma avaliação do ponto de vista prático: inicialmente, desligamos os dois tipos de restrições hidráulicas mencionadas acima (vazão mínima e retirada de água), de forma individual, para avaliar a contribuição de cada uma delas na valoração da água do REE do Nordeste. Assim, foram executados três casos:

- “COM_VAZMIN_SIN”: caso original oficial do PMO;
- “SEM_RETIR-SIN”: remoção apenas das restrições de retirada de água do caso original;
- “SEM_VAZMIN_SIN”: remoção apenas das restrições de vazão mínima do caso original.

Os resultados de valor médio da água do REE Nordeste ao longo do horizonte de estudo, considerando todos os cenários da simulação final, são mostrados na Figura 3.1 a seguir.

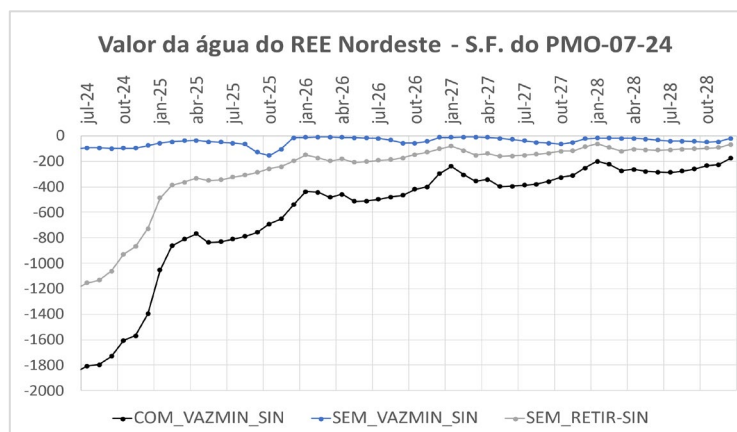


Figura 3.1 – Efeito, no valor da água do REE Nordeste ao longo do horizonte de estudo, da remoção de restrições de vazão mínima (curva azul) e retirada de água (curva cinza).

Observa-se que o impacto mais significativo está associado à restrição de vazão mínima, visto que a remoção apenas desse tipo de restrição foi suficiente para reduzir bastante o valor da água. Já o caso em que foram removidas somente os requisitos de retiradas de água para outros usos continua a apresentar elevação dos valores da água, principalmente no início do horizonte de estudo.

3.2 Avaliação do impacto das restrições de defluência mínima no valor da água do REE Nordeste

Estendendo a análise a respeito das metas de defluências mínimas associadas às usinas que compõem o REE Nordeste, realizamos uma sensibilidade para manter ativa a funcionalidade de defluência mínima, porém reduzindo os valores das restrições mais demandantes do REE Nordeste, conforme figura abaixo.

HIDRELÉTRICA	COM_VAZMIN_SIN	0,9*VAZMIN_NE	0,8*VAZMIN_NE	0,75*VAZMIN_NE	0,5*VAZMIN_NE	0,25*VAZMIN_NE	SEM_VAZMIN_SIN
169 SOBRADINHO	800	720	640	600	400	200	0
172 ITAPARICA	1100 800	990 720	880 640	825 600	550 400	275 200	0
176 COMP PAF-MOX	1100 800	990 720	880 640	825 600	550 400	275 200	0
294 FICT. QUEIMAD	=	=	=	=	=	=	0
295 FICT. TRES MA	=	=	=	=	=	=	0
308 FICT. RETIRO	=	=	=	=	=	=	0
178 XINGO	1100 800	990 720	880 640	825 600	550 400	275 200	0
154 ITAPEBI	=	=	=	=	=	=	0
298 FICT. IRAPE	=	=	=	=	=	=	0
189 P. CAVALO	=	=	=	=	=	=	0
190 B. ESPERANÇA	=	=	=	=	=	=	0

= SEM ALTERAÇÃO

Figura 3.2 – Metas de vazão mínima flexibilizadas, em diferentes níveis, nas análises de sensibilidade do impacto dessas restrições.

Na Figura 3.3 apresentamos uma sensibilidade a respeito do impacto nos valores da água do REE Nordeste em relação a reduções das metas de vazão mínima. Observa-se que o caso "0,25*VAZMIN_NE", onde foi realizada uma redução de aproximadamente 75% das principais metas de defluência mínima do Nordeste apresenta valores próximos ao caso em que se retirou a funcionalidade do deck. Também se destaca que a redução de apenas 10% das principais meta feita no caso 0,9*VAZMIN_NE não foi suficiente para reduzir consideravelmente os valores da água, o que só passou a ocorrer a partir de reduções superiores a 20%.

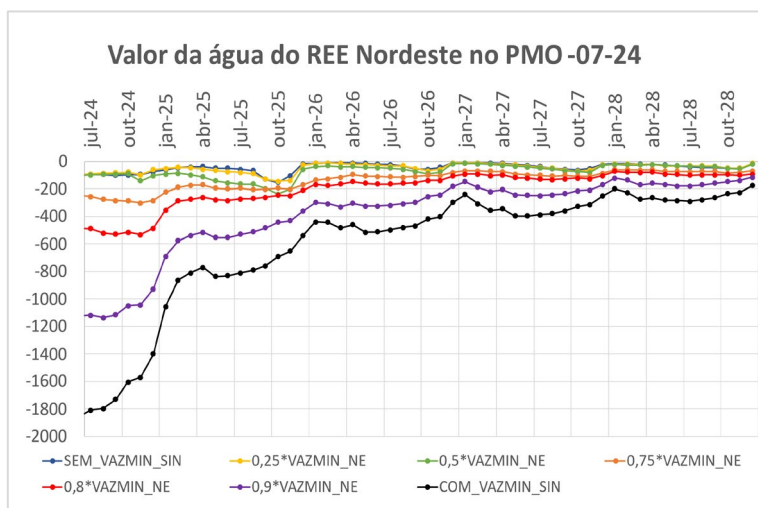


Figura 3.3 – Impactos nos valores da água do REE Nordeste ao longo do horizonte do NEWAVE, para os casos com sensibilidade das restrições de vazão mínima.

Ressalta-se que, tendo em vista o objetivo de avaliar o impacto das restrições no valor da água do Nordeste, pode haver outras diferenças que não estão mostradas nesse gráfico.

Na Figura 3.4 apresenta-se o impacto, no custo médio de operação, da flexibilização das restrições de vazão mínima. Embora o comportamento não seja necessariamente monótono, visto que os valores estão sujeitos à variabilidade intrínseca da simulação estocástica, observa-se uma clara tendência de redução do custo de operação ao relaxar essas restrições.

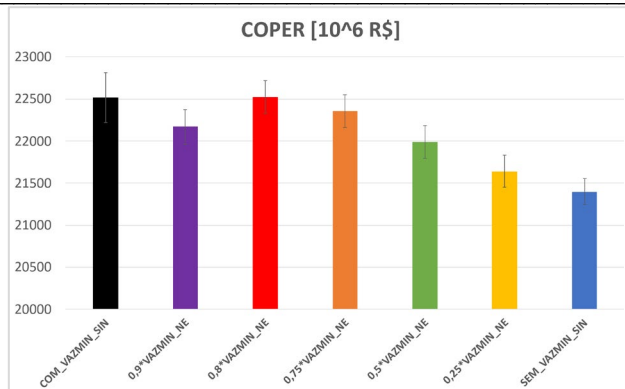


Figura 3.4 – Impacto no custo total de operação das reduções progressivas nas restrições de vazão mínima no modelo NEWAVE.

3.3 Avaliação do impacto da redução da demanda líquida no valor da água do REE Nordeste

Por fim, fazemos uma análise para mensurar mais claramente o impacto do excesso de geração no submercado Nordeste. Para essa análise, a geração eólica declarada para o submercado Nordeste foi removida do PMO de junho de 2024. Nos gráficos pode-se verificar que, com o excesso de geração eólica no REE Nordeste, observada no caso original, de fato há uma redução do valor da água do REE Nordeste em relação ao caso sem geração eólica. A diferença na média dos valores da água do Nordeste chega a apresentar uma redução de até 1400 R\$/MWh no início do horizonte, enquanto as vazões mínimas são responsáveis por aproximadamente 1700 R\$/MWh nesse mesmo período.

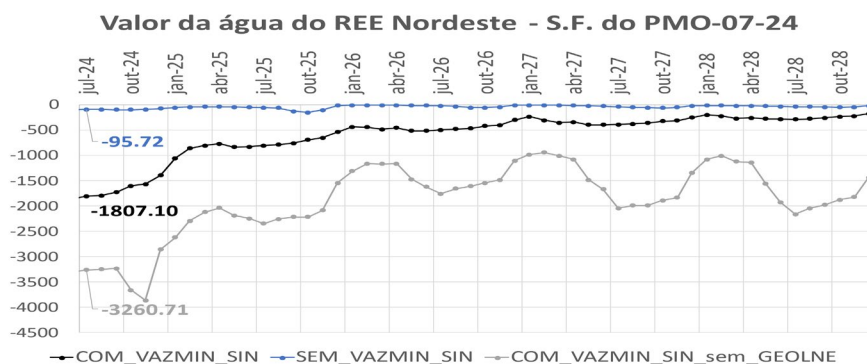


Figura 3.5 – Efeito do aumento da demanda líquida no valor da água do Nordeste.

Esta análise mostra que, apesar de a demanda líquida reduzida no caso oficial promover uma redução significativa no valor da água, comparada ao caso hipotético sem geração eólica, esta não é suficiente para tornar os valores da água muito baixos, visto que uma parcela significativa do valor da água é motivada pelas restrições de vazão mínima. Para comprovar esse entendimento, realizou-se uma análise adicional dobrando o valor de geração eólica no NE e verifica-se que, apesar de continuar promovendo uma redução nos valores da água do REE Nordeste, mesmo com este valor exagerado de geração do NE os valores da água do REE NE continuam elevados, como mostra a Figura 3.6.

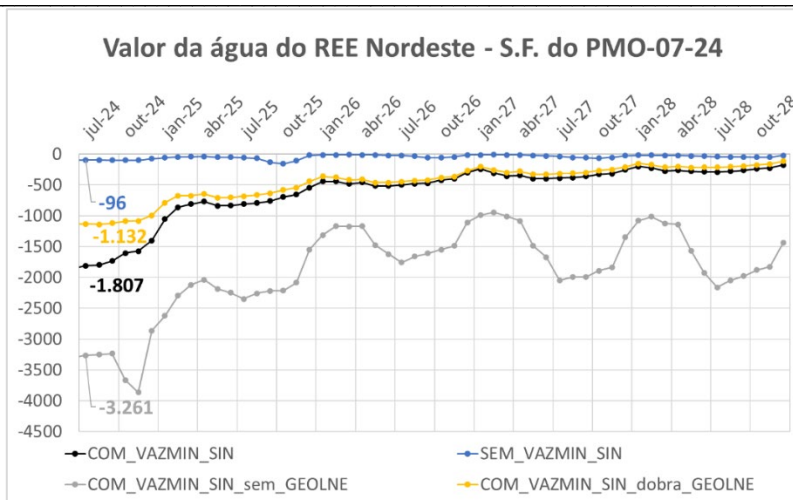


Figura 3.6 - Sensibilidade adicional da redução do valor da água do REE NE dobrando-se o valor de geração eólica do submercado NE (curva amarela).

3.4 Identificação de mudança dos valores da água no PMO de junho de 2024

Avalia-se, nessa seção, se houve uma mudança relevante de comportamento no modelo em relação à valoração da água do REE Nordeste no PMO de Junho/2024, em relação ao que havia sido sinalizado no PMO de Maio/2024. Conforme mostrado na Figura 3.7, embora já houvesse uma sinalização mais elevada do valor da água de julho em diante para o PMO de Maio/24, este valor da água tornou-se ainda maior⁴ (acréscimo de aproximadamente 40%) no PMO de Junho/24.

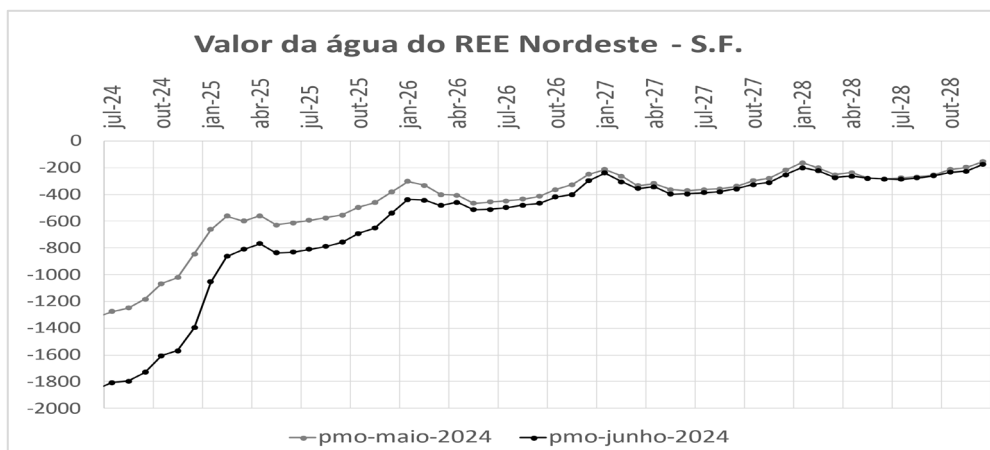


Figura 3.7 – Valor da água médio nos PMOs de maio e junho de 2024.

Com o objetivo de identificar possíveis causas desse aumento na magnitude do valor da água do REE NE no PMO de junho de 2024, faz-se uma avaliação comparativa dos recursos hidráulicos (armazenamento e vazões naturais afluentes) entre esses dois PMOs.

⁴ Observa-se que, como o valor da água é intrinsecamente negativo, a avaliação quantitativa é sempre feita com base nos valores em módulo.

3.4.1 Armazenamento no início de Junho/24

De acordo com a Figura 3.8, observa-se que o armazenamento inicial do REE Nordeste no PMO de junho (em laranja) encontra-se muito próximo do valor médio da distribuição de energias armazenadas no mesmo instante de tempo, obtidas com simulação no PMO de maio. Isso mostra uma aderência entre os recursos hidráulicos já existentes para atendimento ao submercado Nordeste nestes dois casos.

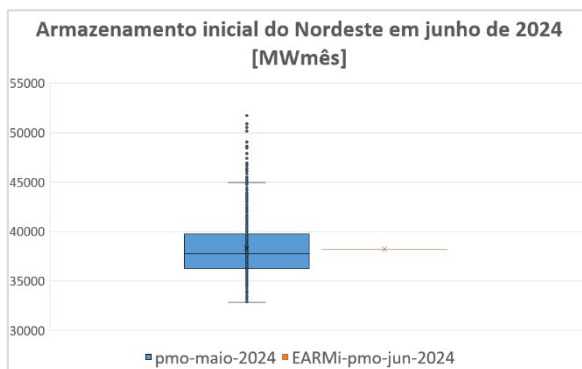


Figura 3.8 - Comparação da energia armazenada do NE ocorrida no início de Junho/24, em relação ao intervalo de confiança de 95% da distribuição obtida no PMO de Maio/24.

3.4.2 Vazões afluentes a partir de Junho/24

Em seguida, comparamos as distribuições de energias afluentes brutas geradas pelo NEWAVE⁵ do REE NE a partir de Junho/24, em relação às que haviam sido geradas para o mesmo período no PMO de Maio/24. As curvas de valores médios e percentil 5% e 95%, ao longo de todo o horizonte e com um “zoom” somente no primeiro ano, são mostradas na Figura 3.9.

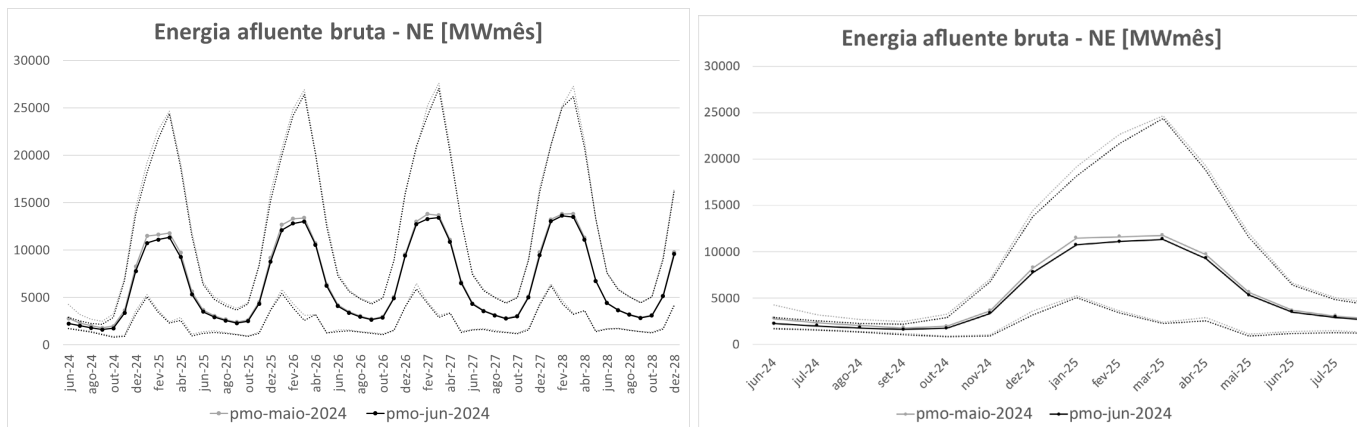


Figura 3.9 - Comparação entre os valores P5, média e P95 das distribuições de energias afluentes para o REE Nordeste, entre os PMOs de Maio/24 e Junho/24.

Observa-se que, conforme esperado, não há uma diferença brusca entre as duas curvas, visto que a modelagem do PAR(p)-A [2], [3] confere maior estabilidade entre as atualizações dos cenários gerados de um PMO para o outro. Entretanto, é possível identificar uma leve redução nos percentis e valores

⁵ Esta geração é feita com base no módulo GEVAZP embutido no programa, que utiliza a modelagem PAR(p)-A.

médios de ENA, que estão coerentes, em princípio, com o aumento no valor da água do NE no PMO de Junho/24, em relação ao que havia sido sinalizado em Maio/24.

3.4.3 Restrições de vazão mínima impostas ao longo do horizonte

Comparando as restrições de vazão mínima entre os PMOs de Maio e Junho/24 (Figura 3.10), observa-se uma diferença relevante para as usinas do Nordeste no mês de Julho/24 (vide zoom à direita). Essa diferença, de 300 m³/s nas três usinas citadas no gráfico (Itaparica, Complexo Moxotó e Xingó)⁶, tem grande potencial para explicar a diferença no valor da água do REE nordeste entre os dois PMOs.

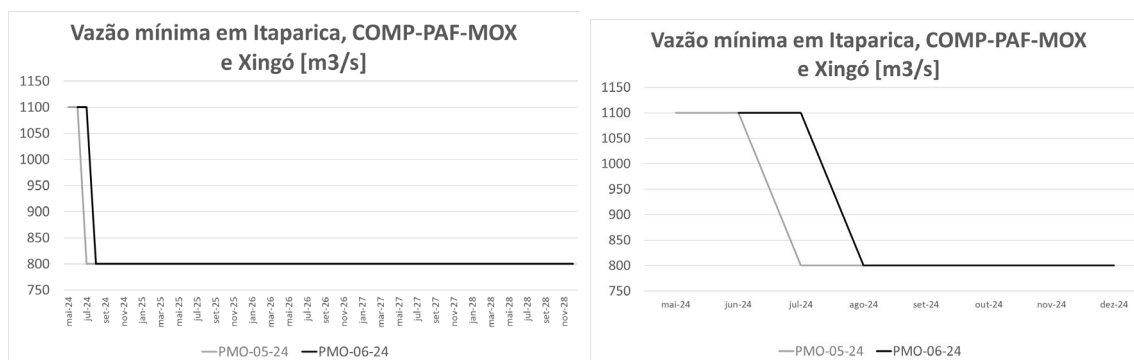


Figura 3.10 - Comparação entre as restrições de vazão mínima de Itaparica, Complexo Moxotó e Xingo para Julho/24, entre os PMOs de Maio e Junho/2024.

⁶ Para as demais usinas as restrições não se modificam ou tem variações não relevantes para a análise.

4 RELAÇÃO ENTRE VALORES DA ÁGUA E VIOLAÇÃO DE RESTRIÇÕES

Nesta seção, avalia-se a relação entre os valores elevados da água, observados para o REE Nordeste, e as violações de restrições hidráulicas operativas associadas a esse REE, tanto durante o processo de convergência da PDDE como na simulação final. Para um melhor entendimento do que é exposto a seguir, apresentam-se as seguintes definições:

- **multiplicador do Balanço hídrico** (λ_{BHID}): multiplicador de Lagrange da equação de balanço hídrico, que mede a sensibilidade, na função objetivo do problema, de um acréscimo marginal de energia armazenada, que pode ser utilizada no próprio período ou armazenada para uso futuro;
- **valor da água** ($\pi_{EARM_{iree,icor}}^t$): coeficiente associado à energia armazenada do REE *iree* para o corte de Benders *icor*, que foi construído no período t , e é consultado pelo período $t - 1$. Este valor é calculado com base no valor λ_{BHID}^t , além das variáveis duais de todas as restrições nas quais aparece a variável de estado associada à energia armazenada. Ressalta-se que, na resolução do problema do período t , os coeficientes da FCF correspondem a $\pi_{EARM_{iree,icor}}^{t+1}$, que são chamados então de “valores futuros da água”;
- **valor futuro ativo da água**: coeficientes $\pi_{EARM_{iree,icor}}^{t+1}$ dos cortes ativos na resolução do subproblema do período t .

A seguir, apresentam-se as análises realizadas em relação a essa questão.

4.1 Frequência de violação das restrições hidráulicas durante a PDDE

Inicialmente, esclarece-se o porquê de terem sido encontrados valores da água elevados para o REE Nordeste, mesmo tendo sido muito pequenos os percentuais de violação de restrições na simulação final do modelo NEWAVE. A Figura 4.1 mostra a frequência de violações das restrições de vazão mínima (esquerda) e retirada de água (à direita) na simulação final do NEWAVE do PMO de Junho/2024, ou seja, após a construção da política operativa. Os pequenos montantes de violação observados sugerem que a política operativa calculada foi efetiva para o atendimento dessas restrições, tanto quanto possível.

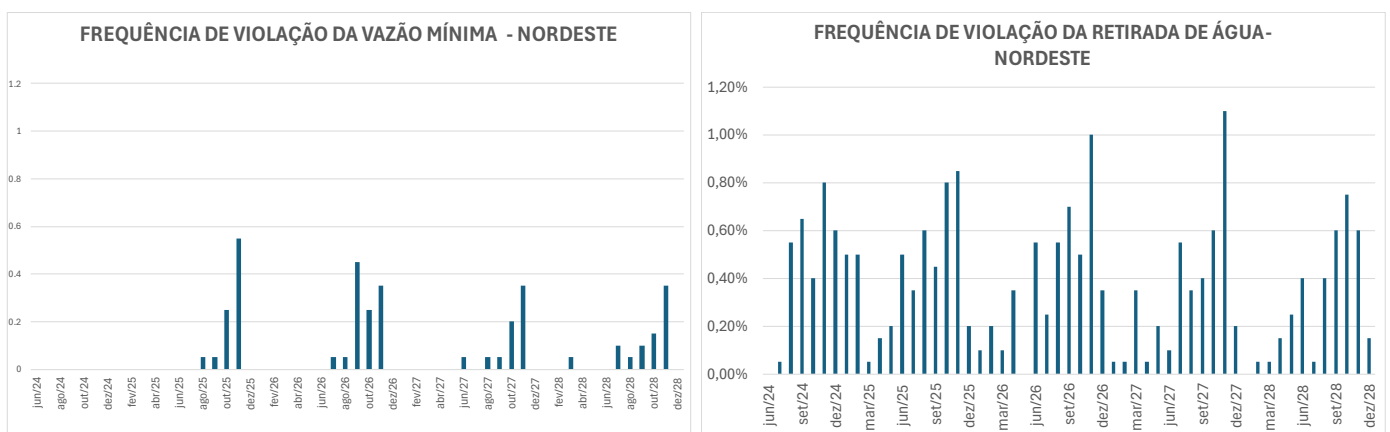
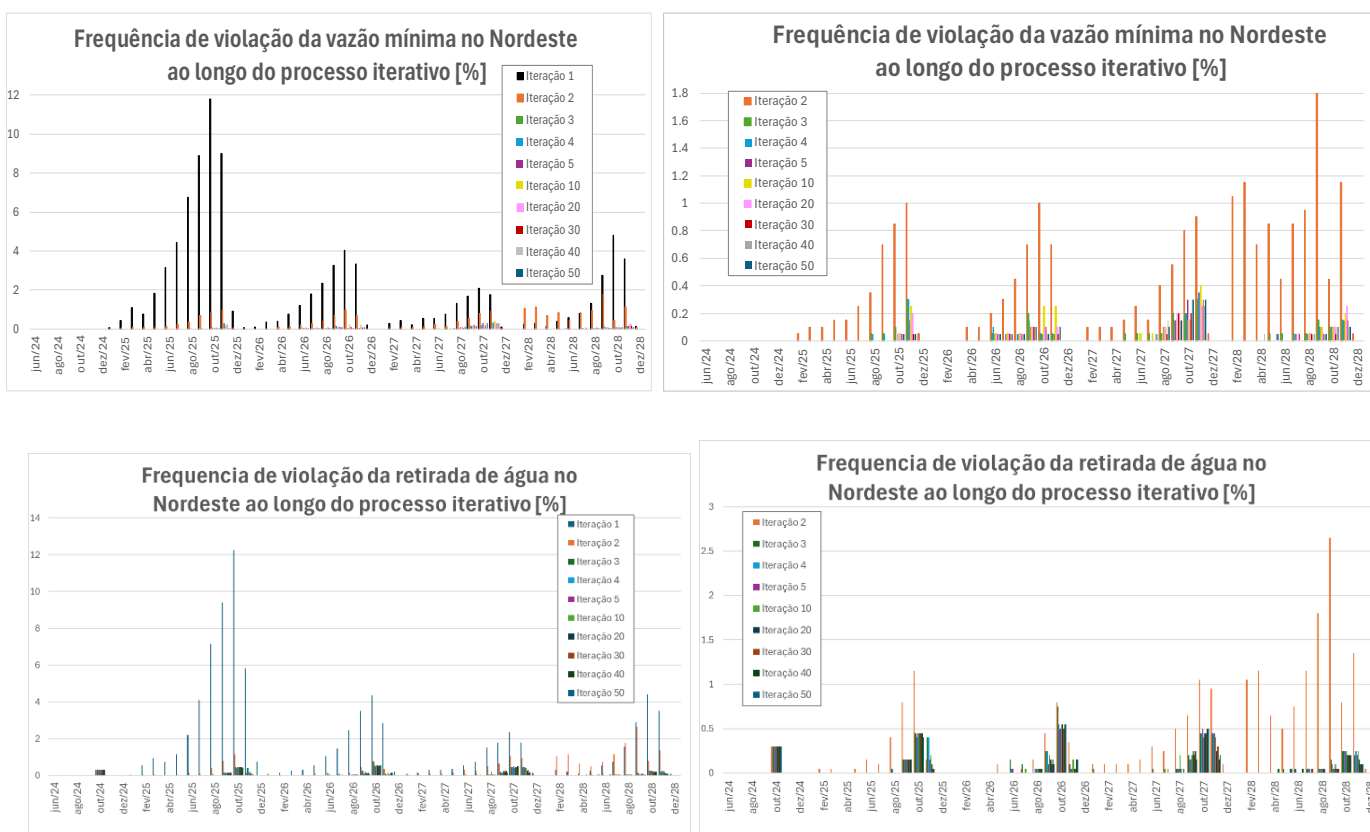


Figura 4.1 - Frequência de ocorrência de violações das restrições hidráulicas de vazão mínima e retirada de água nos cenários da simulação final do PMO de Junho/2024.

É importante ressaltar que a penalização de restrições é uma forma de fazer com que, em algoritmos de decomposição temporal, como a programação dinâmica dual estocástica (PDDE), os estágios (períodos

de tempo) anteriores possam se “preparar” para possíveis violações que possam ocorrer em estágios posteriores. Como alternativa ao uso de penalizações, podem ser adotados cortes de viabilidade ([7], cap. 6), que impõem condições (sob a forma de cortes) para a solução dos estágios anteriores de forma a forçar explicitamente o atendimento da restrição no futuro. No caso dos modelos do CEPEL que empregam PDD (DECOMP) ou PDDE (NEWAVE), optou-se pelo uso de penalizações (ao invés de cortes de viabilidade) devido a duas vantagens importantes: sempre retornar uma solução ou política de operação⁷, mesmo que o problema como um todo seja inviável, e sinalizar ao usuário, em uma execução única do modelo, os montantes de violação ocorridos nas diversas restrições, ao longo do tempo. Um estudo comparativo dessas duas estratégias, com aplicação para um problema determinístico convexo resolvido por PDD, no modelo DESSEM, é apresentado em [8].

O efeito da redução das violações das restrições hidráulicas ao longo da estratégia de solução por PDDE, mesmo quando se aplica reamostragem⁸, é ilustrado na Figura 4.2. Percebe-se que o número de violações na primeira iteração é bem mais elevado, pelo fato de ser realizada discretizando-se os estados de armazenamento, de 0 a 100%, o que pode levar a combinações de armazenamentos muito pessimistas. Nas iterações seguintes, percebe-se a redução gradativa do montante de violações, que já se torna muito pequeno em torno da 10ª iteração.



⁷ O uso de cortes de viabilidade faz com que, se o problema como um todo for inviável, o processo de resolução seja interrompido antes de concluir a primeira iteração da PDD ou PDDE, indicando o primeiro estágio como inviável. Além disso, no modelo NEWAVE, é impraticável impor que todas as restrições sejam atendidas, em virtude da grande magnitude de cenários e extensão do horizonte de estudo.

⁸ Ressalta-se que a reamostragem promove o sorteio de novas séries forward a cada iteração da PDDE, que são diferentes das utilizadas nas iterações anteriores, para cujos estados os cortes já existentes foram construídos.

Figura 4.2 - Redução das violações das restrições hidráulicas ao longo das iterações da PDDE (para facilitar a visualização, elimina-se a iteração 1 nos gráficos à direita).

Ressalta-se que, para proporcionar essa pequena frequência de violações, é necessário que os cortes da FCF tenham coeficientes (valores da água futuros) elevados para o REE Nordeste, de forma a estimular a operação dos estágios anteriores a armazenar água o suficiente para evitar (ou reduzir) as violações futuras de restrições hidráulicas.

Assim, uma primeira conclusão importante da análise adicional que foi feita é que a ocorrência de baixas violações das restrições hidráulicas não é incompatível com a existência de valores futuros da água elevados nos cortes da FCF. Pode-se dizer, ainda, que é esperado que esse baixo percentual de violações esteja associado a elevados valores da água.

4.2 Efeito acumulativo dos valores da água

Nesta seção procura-se ilustrar o efeito acumulativo dos valores da água como decorrência da violação de restrições em períodos sucessivos de tempo. O exemplo a seguir, da Figura 4.3, mostra cortes que foram efetivamente construídos no PMO de junho, com os parâmetros oficiais de penalização e aversão a risco, na segunda iteração da PDDE, para estágios 120 (à direita) e 119 (à esquerda), em determinada série (194). Observa-se que, no período 120, apenas cinco das 20 aberturas backward apresentaram violações de restrições hidráulicas, para as quais o valor da água da abertura foi praticamente igual à penalidade de violações dessas restrições, sendo nulo para os demais cenários onde a restrição não foi violada. Como resultado, o valor da água médio⁹ assumiu um valor elevado (R\$ 3992/MWh), que é intermediário entre o valor zero e a penalização da violação das restrições.

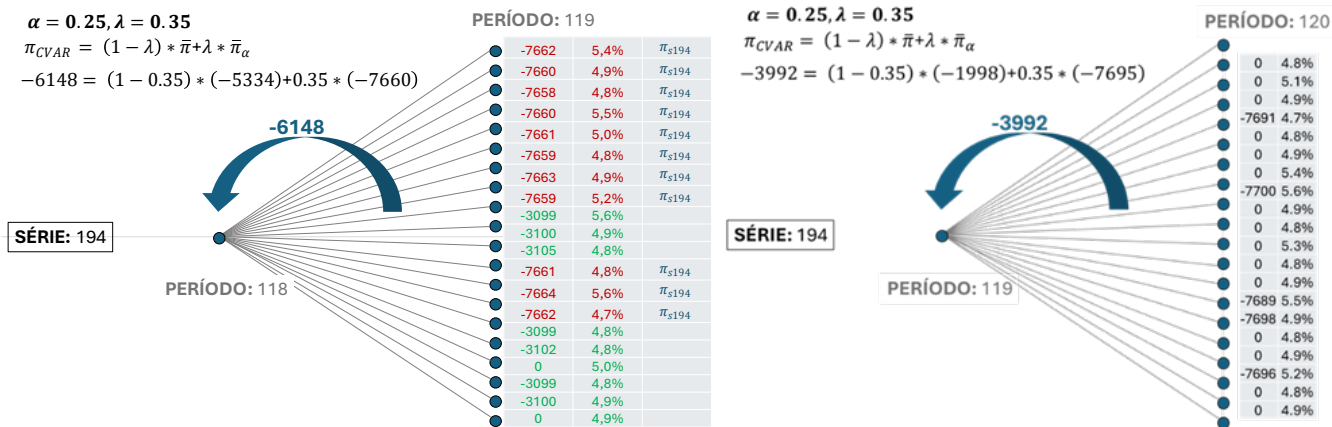


Figura 4.3 - Construção dos valores da água do NE na segunda iteração do algoritmo no PMO de Junho de 2024.

Na sequência, o gráfico à esquerda da mesma figura indica alguns resultados da resolução das aberturas para o estágio 119, na mesma série, tais como: o valor da água obtido em cada cenário (R\$/MWh); a probabilidade de cada cenário, com indicação se as restrições hidráulicas do NE foram violadas (vermelho) ou atendidas (verde); um flag indicativo se o corte construído pela série 194 ficou ativo quando foi incluído na FCF do período 119 (em conjunto com os cortes de todas as outras séries).

Com base nessas figuras, conclui-se que:

⁹ Considerando os pesos ajustados de cada cenário em virtude dos parâmetros λ e α do CVAR.

- o valor da água final construído para o corte médio não necessariamente é igual ao valor da penalidade de vertimento, visto que, em alguns cenários, não houve violação das restrições;
- há um fator acumulativo no valor da água quando há violações de restrições hidráulicas em períodos consecutivos. Observa-se que, para os cenários não violados no período 119, ao invés de o valor da água ser nulo, torna-se próximo ao valor médio da água calculado pelo período 120 quando o corte se torna ativo, que é, neste exemplo, de R\$3.992,00/MWh. Assim, o valor médio da água calculado pelo período 119 (e que é transmitido para o período 118) é de R\$6.148,00/MWh.

De forma a ilustrar de maneira mais geral o efeito acumulativo da penalização, consideremos os percentuais de violação $v^t\%$ para cada período t , nas recursões backward¹⁰ da PDDE. Sendo λ e α os parâmetros de CVaR, π_v^{t+1} o valor da água "médio" vindo do período $t + 1$, e Pen_{viol} a penalidade de violação, pode-se realizar, de forma recursiva, uma estimativa da ordem de grandeza do valor da água médio para cada período t conforme mostrado abaixo, onde se assume que $v^t < \alpha$.

$$\pi_v^t = \frac{1}{1 + \beta} ((1 - \lambda)[\pi_v^{t+1}] + \lambda \left[\left(\frac{\alpha - v^t}{\alpha} \right) \pi_v^{t+1} + \left(\frac{v^t}{\alpha} \right) Pen_{viol} \right])$$

Realizando o cálculo acima para os valores de v^t observados na 2ª iteração da PDDE¹¹, com os parâmetros do CVaR $\lambda = 35$, $\alpha = 0,25$, taxa de desconto de 12% a.a., penalidade de violação $Pen_{viol} = R\$7810,00/MWh$, e partindo-se de um valor $\pi_v = 0$ para Janeiro de 2028 (de forma a ser conservador), obtém-se um valor acumulativo de R\$2.496,62/MWh.

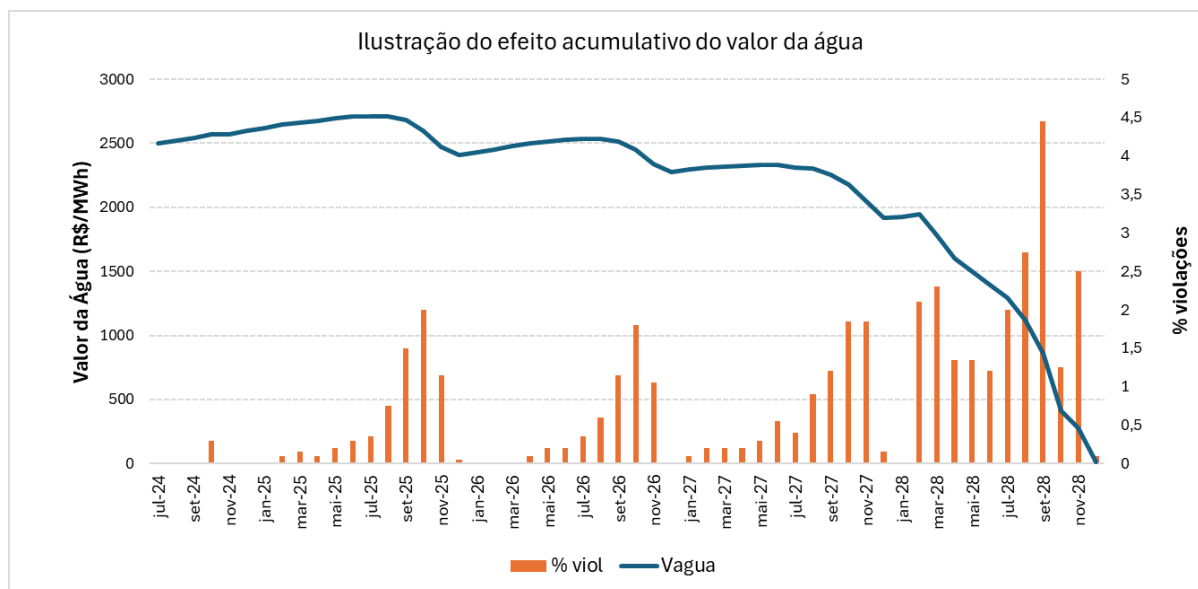


Figura 4.4 - Exemplo ilustrativo do cálculo acumulativo do valor da água (azul), em função do % de violações ocorridos ao longo dos períodos da PDDE.

Ressalta-se que este cálculo é apenas uma ordem de grandeza, visto que:

¹⁰ para fins desse cálculo, considera-se que o % de violações na backward e forward são semelhantes.

¹¹ utilizou-se a segunda iteração pelo fato de que é a primeira em que os estados atingidos percorrendo as séries amostradas, partindo de uma simulação forward a partir do armazenamento inicial.

- não necessariamente serão acessados cortes com a inclinação π_v^{t+1} indicada. Devido à variabilidade dos estados que de armazenamento que podem ser atingidos, este valor da água pode ser o de um corte construído por outra série, resultando em um valor da água menor ou menor ao considerado;
- não se diferenciam os valores da água entre os diferentes cenários que não foram violados, quando, na verdade, cenários mais caros tendem a ter valores da água maiores, ainda que não violados. Este é o motivo pelo qual não ocorreu, nesse cálculo simplificado, elevação maior de valor da água nos dois primeiros períodos (ao contrário do verificado na Figura 3.1), já que não houve violações de restrições hidráulicas nestes períodos;
- assume-se que, ao longo da recursão *backward*, a série respeita exatamente os percentuais de violação médios do passo *forward*;
- considera-se que o corte ativo de uma série foi o mesmo construído nessa série, no período posterior.

De qualquer forma, este cálculo sugere que o valor obtido na Figura 3.1 para Julho/24, não é exagerado em relação os montantes de violação ocorridos nas primeiras iterações da PDDE.

Em seguida, apresenta-se uma análise mais detalhada da evolução cíclica dos valores da água do REE Nordeste, que já havia sido evidenciada anteriormente no gráfico da Figura 3.1. Para este tipo de análise, considerou-se um ano do horizonte de estudo que esteja “suficientemente longe” da condição inicial de armazenamento. Para tal, apresenta-se na Figura 4.5 uma análise do comportamento médio do REE Nordeste, em relação ao armazenamento, onde se observa que, a partir do terceiro ano (2026), já se atinge um comportamento razoavelmente cíclico.

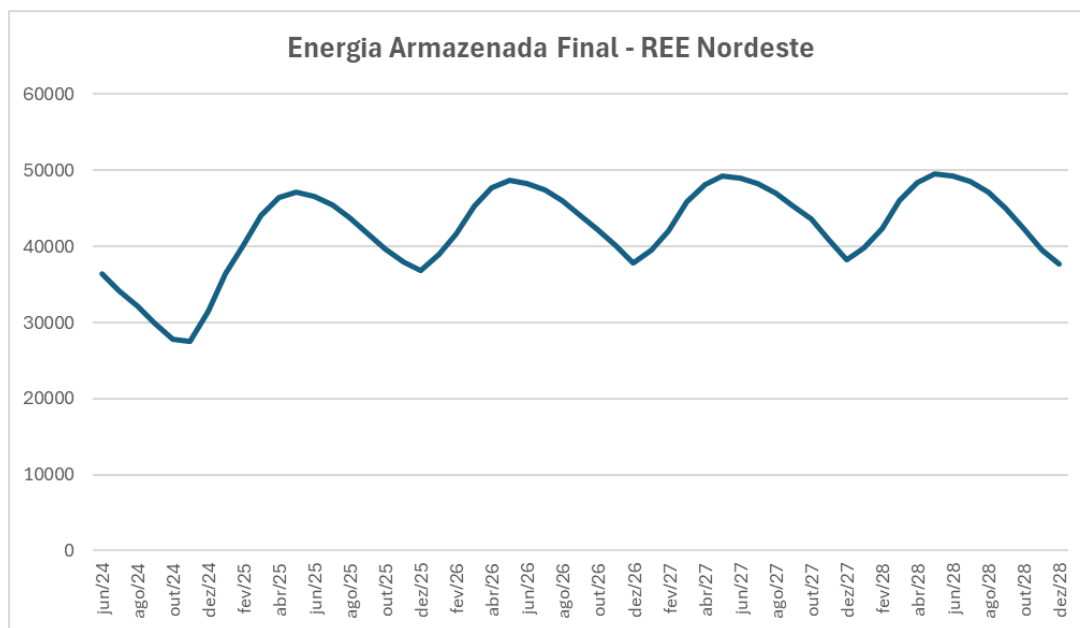


Figura 4.5 - Comportamento da energia armazenada média do REE Nordeste ao longo do horizonte de planejamento.

Portanto, refinou-se a análise para o terceiro ano do estudo, para entender melhor o comportamento das violações das restrições e valores da água. Inicialmente, verificou-se o nível de violação das restrições hidráulicas ao longo do terceiro ano, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Percentual médio de violações das restrições hidráulicas ao longo do terceiro ano na simulação final do NEWAVE (%)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2025	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,25	0,75	0,85	0
2026	0	0	0	0	0	0	0,05	0,10	0,85	0,80	0,55	0
2027	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,10	0,15	0,65	0,70	0

5 ANÁLISE DA OPERAÇÃO DO REE NORDESTE

Nesta seção, faz-se uma análise estatística da operação do REE Nordeste para o caso em análise do NEWAVE, que auxilia no entendimento da magnitude dos valores da água obtidos

5.1 Análise da Operação do NE na janela entre Novembro e Março

Verifica-se que a janela onde ocorrem violações é entre Junho e Novembro. Portanto, a cada ano, os meses da estação chuvosa (Novembro a Março) devem se “preparar” para colocar o REE Nordeste em condições “ideais” para atender à restrição ao longo do período seco. Por este motivo, analisa-se, na Figura 5.1, a operação média, durante o cálculo da política, dos estágios 35 a 39, que correspondem aos meses entre Nov/2026 e Mar/2027, para atendimento às restrições no 4º ano do estudo (2027).

Esta figura mostra, para o REE Nordeste:

- em azul, o percentual de vezes em que o armazenamento do REE Nordeste atingiu o valor máximo;
- em verde, o valor médio de energia vertida, em MWmes;
- em vermelho, o % de violação das restrições hidráulicas;
- abaixo do gráfico, o box-plot dos valores da água;

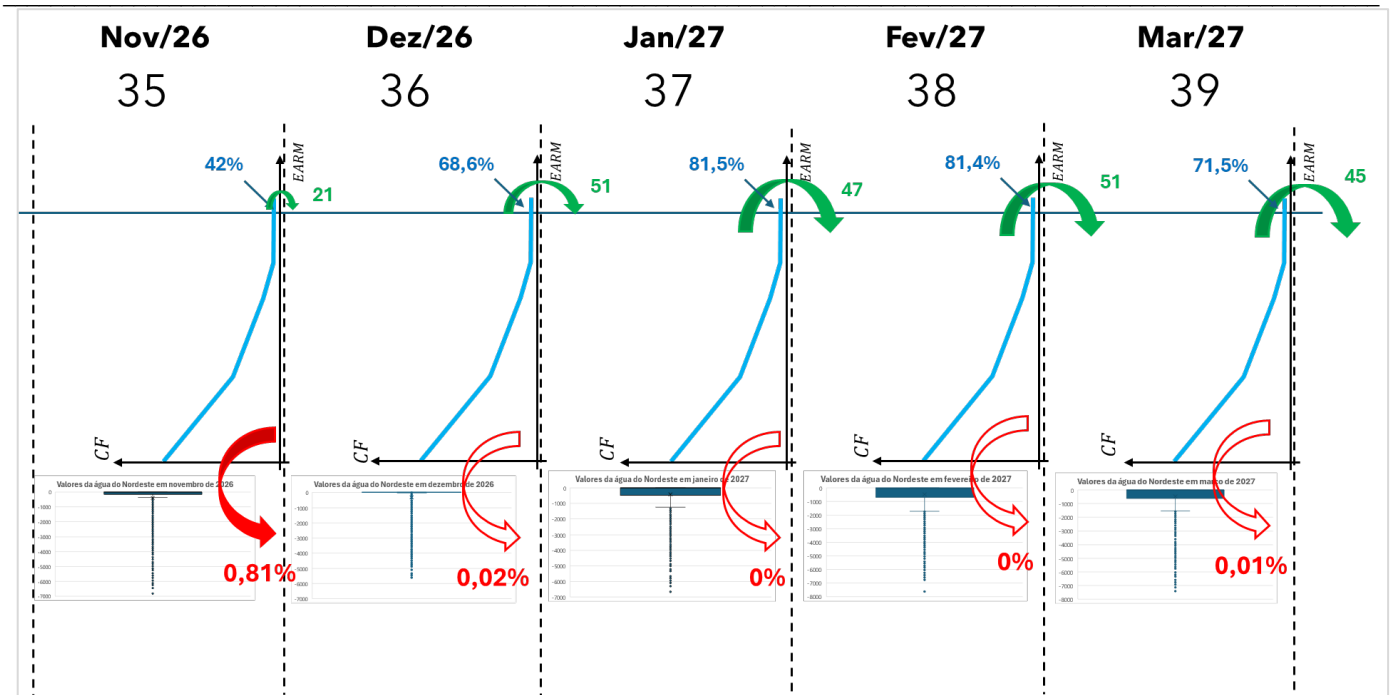


Figura 5.1 - Esquema ilustrativo da operação dos reservatórios e valores da água entre Nov/26 e Mar/27

Nota-se o elevado percentual de vezes em que o REE Nordeste atinge o armazenamento máximo em Janeiro e Fevereiro, o que justifica o elevado vertimento ocorrido nesses meses. Observa-se que a violação de restrições operativas foi nula entre Dezembro e Março. Entretanto, nota-se que, ao longo de toda essa janela de tempo, os valores da água não atingem valores médios próximos de zero: há um “vale” em Dez/26, onde se verifica um valor médio de R\$333,46/MWh, e verifica-se que os valores da água vêm decrescendo (caminhando-se retroativamente no texto) de Mar/27 em direção a Nov/26, pois a necessidade maior de elevados armazenamentos é no final de Março. Já em Novembro os valores da água voltam a aumentar (novamente, no sentido retroativo no tempo), aumentando progressivamente a medida em que se caminha para Março, como já foi sinalizado anteriormente na Figura 3.1.

Isto pode ser entendido da seguinte forma: os períodos posteriores enviam, para o período t , valores elevados de água e que orientam este período, a “guardar” água, de forma a evitar ou reduzir violações de restrições no futuro, conforme já discutido na seção 4.1. Entretanto, dada a grande variabilidade nas vazões, muitas vezes atinge-se o período t com uma combinação de armazenamentos e vazões elevadas, o que provoca vertimentos. Portanto, podem ocorrer valores nulos dos multiplicadores das equações de balanço hídrico, mesmo com coeficientes elevados no corte ativo da função de custo futuro. A análise desse efeito é apresentada na seção 5.3.

5.2 Análise da Operação do NE na janela entre Abril e Outubro

Verifica-se agora, o comportamento das variáveis operativas (Tabela 5.1) assim como dos valores da água (Figura 5.2) entre os períodos de abril e outubro no REE Nordeste, para o ano de 2027

Tabela 5.1 - Comportamento da operação do REE Nordeste entre Abril e Outubro/2027,

Valores médios	Jun	Jul	Ago	Set	Out
----------------	-----	-----	-----	-----	-----

Análise da Sinalização de Valor da Água Elevado no Reservatório Equivalente de Energia Nordeste no PMO de Junho de 2024 pelo Modelo NEWAVE

(SF) Abr Mai								
Vertimento (MWmed)	5542,14	2755,78	1845,89	1042,74	193,79	195,95	115,44	
Violação de restrições hidráulicas (%)	0	0	0	0,05	0,05	0,15	0,1	
% de atingimento de EARMAX	0,00	54,00	55,50	35,85	13,15	0,00	3,90	

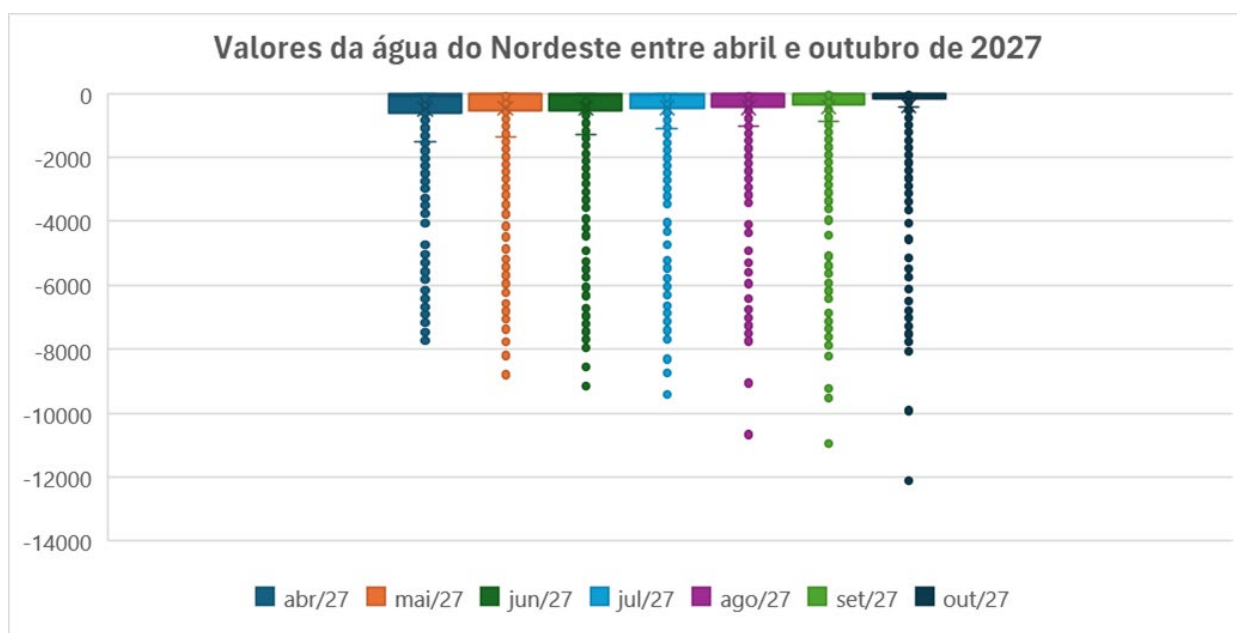


Figura 5.2 - Distribuição dos valores da água entre Abr/27 e Out/27.

Nestes resultados acontece algo interessante: os valores médios da água aumentam gradativamente à medida em que se caminha de outubro até abril (retroativamente no tempo), visto que os períodos anteriores precisam estar mais bem preparados (ou seja, com armazenamentos maiores) para enfrentar as restrições durante o período seco. Entretanto, os valores extremos da água são mais frequentes nos períodos mais para frente (outubro e setembro), quando de fato ocorre um maior número de violações “extremas” e, possivelmente, de violação de ambas as restrições simultaneamente.

5.3 Situação Conjuntural: Anos de 2024 e 2025

As análises apresentadas nas seções 5 e 5.2 visaram avaliar o comportamento cíclico dos valores da água do REE Nordeste nos períodos úmido e seco, respectivamente, suficientemente distantes do início do horizonte de estudo. Nesta seção, apresentam-se os mesmos tipos de resultados – gráficos box-plot de valores da água (Figura 5.3) e operação média na simulação final (Tabela 5.2 e Tabela 5.3)- para os anos de 2024 (2º semestre) e 2025, de forma a verificar a conjuntura nestes dois primeiros anos.

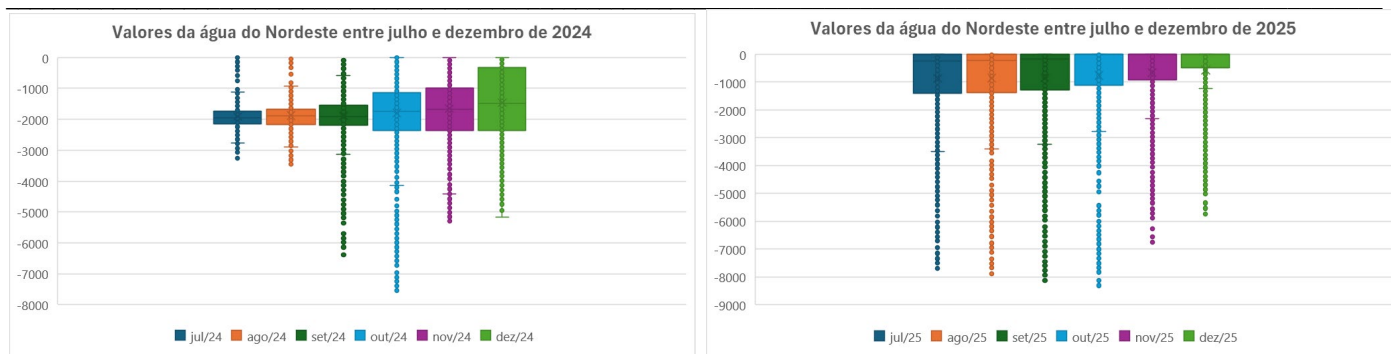


Figura 5.3 - Box plots do valor da água – Julho a Dezembro/24 (esquerda) e Julho a Dezembro/25 (direita)

Tabela 5.2 - Comportamento da operação do REE Nordeste entre julho e dezembro/2024

Valores médios (SF)	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Vertimento (MWmed)	24,29	2,46	0	0	0	5,66
Violação de restrições hidráulicas (%)	0	0	0	0,3	0	0
% de atingimento de EARMAX	0	0	0	0	0	0

Tabela 5.3 Comportamento da operação do REE Nordeste entre julho e dezembro/2025

Valores médios- SF	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Vertimento (MWmed)	631,17	141,02	100,29	167,81	2041,44	6388,26
Violação de restrições hidráulicas (%)	0,00	0,05	0,25	0,75	0,85	0
% de atingimento de EARMAX	17,8	4,3	1,35	0	0	0

Percebe-se que ambos os anos apresentam valores da água bem mais elevados em relação a 2026 em diante. Além disso, o ano de 2024 apresenta valores bem superiores a 2025, o que evidencia a conjuntura desfavorável para o REE Nordeste em Julho/24. Isto é confirmado quando se avaliam as Energias Naturais Afluentes (Enéas) para o REE Nordeste ao longo de todo o horizonte de estudo, onde é visível o volume menor de recursos nos dois primeiros anos e, em especial, em 2024, quando se observaram valores da água muito elevados para o REE NE.

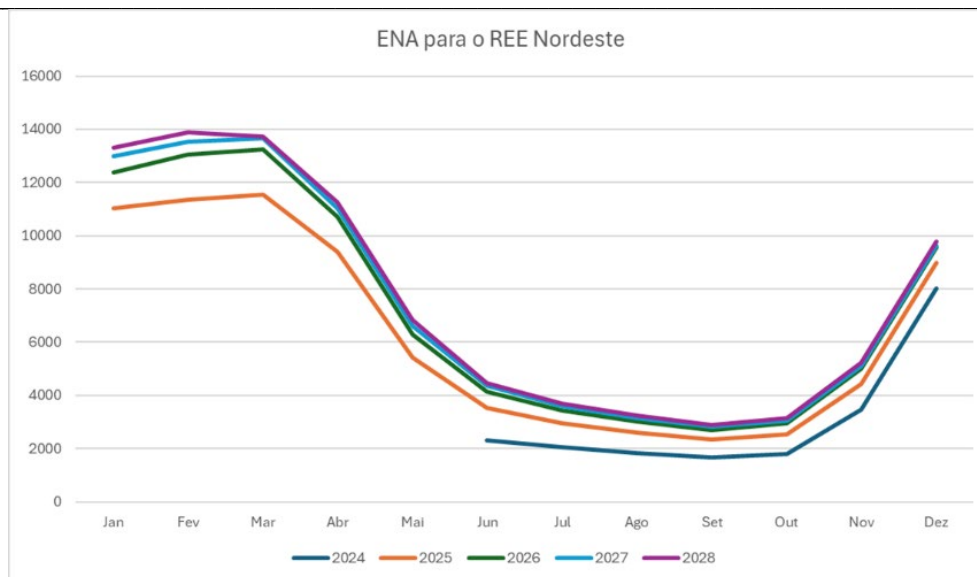


Figura 5.4 – ENAs afluentes NE – ao longo do horizonte de estudo.

5.4 Avaliação do multiplicador do balanço hídrico da água X Valores da água

O objetivo dessa análise é mostrar que a ocorrência de uma frequência elevada de vertimentos (e, consequência, multiplicadores nulos) também não é incoerente com a ocorrência de valores elevados futuros da água. Nestas situações, apesar de haver a indicação de que é importante armazenar água para assegurar ao máximo o atendimento das restrições hidráulicas no futuro (ou seja, valores elevados futuros da água), muitas vezes não é possível mais armazenar água devido ao atingimento de volume máximo de espera do REE Nordeste, o que resulta em multiplicadores nulos na equação de balanço hídrico. Assim, comparam-se os valores de multiplicadores da equação de balanço hídrico (λ_{BHID}^t) em determinado período t , que orientam o despacho de geração para o período t e são utilizados como uma parcela na construção de cortes, e o valores futuros da água ativos (π_{EARM}^{t+1}) na função de custo futuro. O que procura se mostrar é que, embora o multiplicador esteja fortemente relacionado ao coeficiente do corte ativo, muitas vezes há um “descolamento” entre estes dois valores.

A Figura 5.5 mostra a relação entre λ_{BHID}^t e π_{EARM}^{t+1} para o período 36, que corresponde a Dezembro/2026, para o qual, apesar de haver elevados vertimentos em um grande número de situações (vide Figura 5.1), que resultam em multiplicadores nulos, também verificam-se valores futuros ativos da água elevados na FCF. Consultando os dados detalhados, verificou-se que em 5,51% das vezes o multiplicador da equação de balanço hídrico é nulo (não sinalizando, portanto, necessidade de água no presente e não afetando o “custo de geração hidráulica” do NE do NEWAVE), porém o valor da água em pelo menos um corte ativo é diferente de zero, podendo afetar a sinalização de valor da água no modelo DECOMP e, potencialmente, o CMO no DESSEM, caso seja necessário ativar a geração do NE em alguma hora específica. Verificou-se também que em 7,28% das vezes ocorre o contrário: multiplicador de balanço hídrico não nulo com coeficiente ativo da FCF igual a zero, o que evidencia água que foi utilizada para atender a restrições do próprio estágio. Finalmente, verifica-se que em 8% das vezes os valores de λ_{BHID}^t e π_{EARM}^{t+1} diferem entre si em um valor inferior a 5%, que corresponde aos pontos na “diagonal” do gráfico.

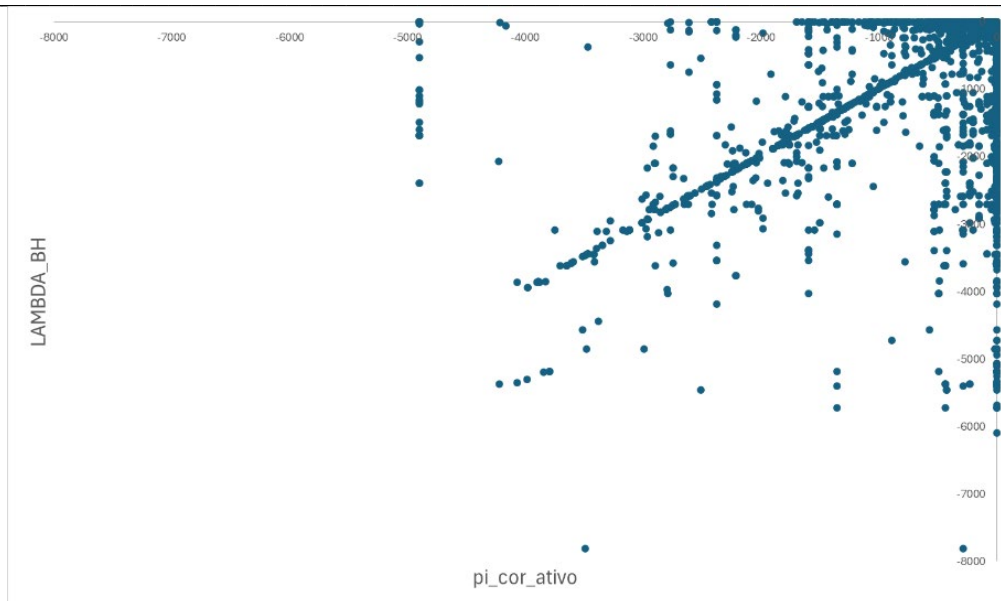


Figura 5.5 – Relação entre multiplicador da equação de balanço hídrico (λ_{BHID}^t) e valor futuro ativo da água do REE Nordeste nas iterações da forward – Dez/2026.

Um aspecto importante é que o valor médio da água em todos os cortes, em si, não é representativo para indicar o que pode ocorrer em cada subproblema (PL) de cada mês, visto que a distribuição é extremamente assimétrica. Como se observa no “zoom” dos gráficos de Novembro a Janeiro, mostrados na Figura 5.6, apesar de a média oscilar de R\$ 300 a 500/MWh, há valores extremos que atingem até o valor da penalidade de vertimento, e o 1º quartil e mediana se confundem, atingido valores próximos de zero. Isto indica que, na grande maioria das situações, o valor da água será nulo, porém pode ocorrer, com alguma probabilidade, valores elevados que, ao serem acessados pelos modelos DECOMP e DESSEM, sinalizarão valores da água elevados para o NE, além de custos marginais de geração hidráulica significativos caso seja necessário ativar a geração no REE Nordeste¹².

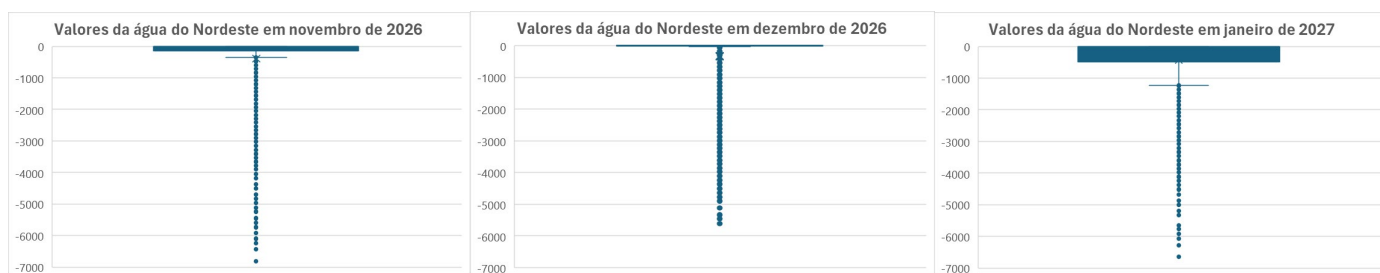


Figura 5.6 - Distribuição dos valores da água entre Nov/26 e Jan/27.

5.5 Avaliação do CMO X Valores da água do NE

Uma análise adicional consiste em explicar o porquê do custo marginal de operação do submercado Nordeste não foi elevado, no modelo NEWAVE, embora tenham ocorridos valores elevados da água. A Figura 5.7 mostra a relação entre o multiplicador da equação de balanço hídrico (que orienta a

¹² em particular, isso pode ocorrer em algum estágio específico do DESSEM, em que a geração eólica do NE estivesse baixa, ou em algum cenário/patamar do segundo mês do DECOMP em que ocorressem cenários baixos de geração eólica, conforme a modelagem apresentada em [9].

necessidade de água no Nordeste no período corrente) e o CMO médio, ao longo do horizonte de estudo. Observa-se que praticamente não há relação direta entre essas grandezas, o que indica que o valor da água está majoritariamente associado ao atendimento às restrições hidráulicas, e não ao atendimento à demanda, como já discutido anteriormente. O que ocorre é que acréscimos de demanda são atendidos com outras fontes de geração, que não as usinas hidráulicas do Nordeste, que operam predominantemente em sua geração referente à vazão mínima devido ao atendimento das restrições hidráulicas.

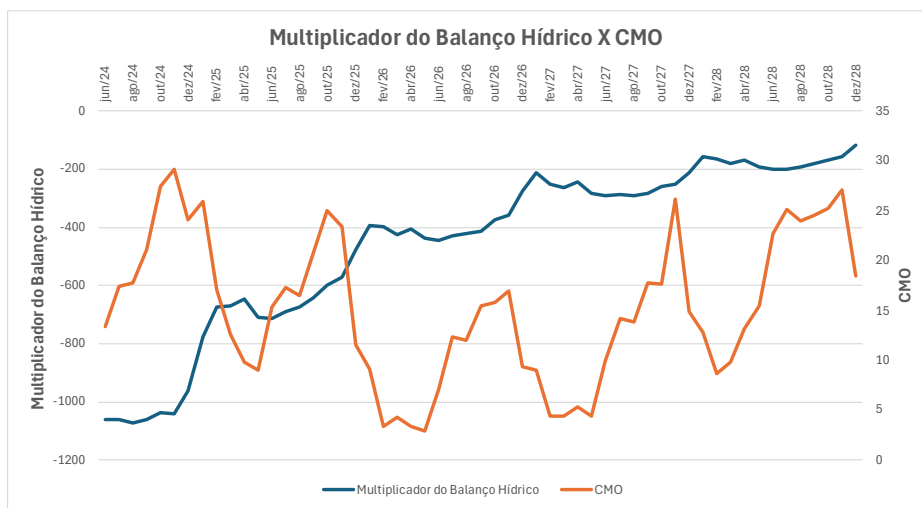


Figura 5.7 – Relação entre custo marginal de operação (CMO) e multiplicador da equação de Balanço hídrico.

5.6 Severidade do atendimento às restrições hidráulicas do NE

Nesta seção, comparam-se as restrições (metas) de vazão mínima e retirada de água para o Nordeste com a distribuição de energia afluyente controlável ao longo do horizonte de estudo. Observando-se o gráfico à esquerda da Figura 5.8, há a impressão de que as restrições são atendidas com certa folga. Entretanto, quando se aplica um zoom (gráfico à direita), verifica-se que, no período seco, a soma desses dois requisitos é aproximadamente o dobro do percentil 5% das vazões, que será (e espera-se que deva) ser atingido ao longo das iterações da PDDE. Associado ao fato de que, pelo modelo autorregressivo periódico, vazões abaixo da média tendem a se prolongar em períodos sucessivos de tempo, conclui-se que é justificável elevar o armazenamento no NE no início do período seco, na maioria das vezes até seu valor de armazenamento máximo para atender a essas restrições, visto o elevado custo de violação.

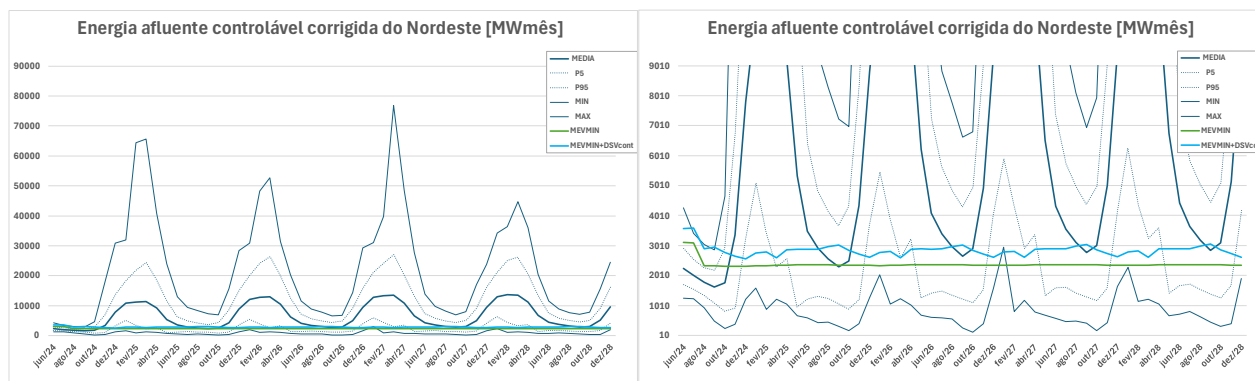


Figura 5.8 - Atendimento a meta de vazão mínimas e a distribuição de aflúências ao longo do horizonte de planejamento do PMO de Junho/2024 (zoom à direita).

6 CONCLUSÕES

Este documento apresenta a análise, realizada pelo CEPEL, com objetivo de justificar o valor elevado da água no reservatório equivalente de energia (REE) Nordeste (NE) observado no modelo NEWAVE, para o PMO de Junho/2024. Este aumento de valor da água foi identificado pelo ONS nas análises preliminares que foram realizadas pela instituição para referentes ao pico de custo marginal de operação (CMO) observado no resultado de PLD do modelo DESSEM, para o dia 28 de junho.

Mostra que o valor da água elevado está diretamente relacionado às restrições de vazão mínima impostas no modelo NEWAVE para o REE NE. As retiradas de água para outros usos também contribuem para esse valor, em menor escala. O efeito de restrições hidráulicas nos valores da água, custos marginais de operação e geração térmica tem sido estudadas recentemente pelo CEPEL [4],[5]. Análises adicionais mostraram que uma relaxação na magnitude dessas restrições contribui para uma redução efetiva no valor da água do REE NE. Outra conclusão é que, embora a demanda líquida reduzida no submercado NE devido ao excesso de geração eólica contribua para a redução do valor da água no REE NE, este efeito é limitado, pois a geração eólica não está diretamente relacionada ao atendimento das restrições hidráulicas. Análises de sensibilidade mostraram que, mesmo aumentando-se artificialmente a geração eólica, não se observa uma redução tão relevante no valor da água do REE NE. Finalmente, verificou-se que há uma baixa relação entre o valor de CMO do submercado NE e o valor da água do REE Nordeste.

Apresentaram-se também estudos em relação ao processo de formação do valor elevado da água para os primeiros períodos do estudo. Inicialmente, analisou-se a redução da quantidade de violações ao longo das iterações da PDDE, que se torna possível a medida em que se constroem cortes com valores elevados da água no REE Nordeste. Assim, constata-se que os valores elevados da água do NEWAVE não são contraditórios ao pequeno número de violações na simulação final, mas até o justifica. O estudo também procurou mostrar, de forma ilustrativa, o efeito da acumulação do cálculo do valor da água, considerando os percentuais de violação ocorridos na segunda iteração da PDDE. Embora o cálculo seja bastante aproximado, o valor obtido é coerente com os valores elevados da água para o REE Nordeste em julho/24.

Adicionalmente, foram feitas análises do comportamento cíclico dos valores da água e atendimento das restrições hidráulicas tanto nos períodos úmidos como nos períodos secos, para anos mais afastados do início do horizonte de estudo. Posteriormente, avaliou-se o atendimento às restrições hidráulicas e valores da água para os dois primeiros anos, onde se verificou que a situação é bem mais crítica quando comparada com os demais anos. Isto é corroborado com a análise das energias naturais afluentes ao longo do horizonte de estudo, que se mostra muito mais baixa nos primeiros anos.

Ressalta-se que a análise apresentada neste documento, apesar de justificar o valor da água elevado no NE, não indica, de forma mais específica, o porquê do CMO no modelo DESSEM ter aumentado apenas no horário de 18h para o dia 28 de junho. Assim, análises complementares são necessárias para explicar esse comportamento específico do modelo DESSEM. De qualquer forma, observa-se que este valor da água elevado no REE Nordeste impacta o chamado “custo marginal de geração hidráulica” (CMH) nos modelos DECOMP e DESSEM e, caso estes modelos necessitem ativar a geração hidráulica no NE além do mínimo exigido para atender às restrições de vazão mínima, haverá um aumento no CMO. A avaliação deste CMH também tem sido realizada pelo CEPEL e apresentada em [6].

7 REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] F. Treistman, M. E. P. Maceira, J. M. Damazio e C. B. Cruz, "Periodic Time Series Model with Annual Component Applied to Operation Planning of Hydrothermal Systems," em *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Liege, Belgium, 2020.
- [3] 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.
- [4] C. B. Cruz, L. C. Brandão, A. L. Diniz e D. J. Penna, "C. B. Cruz, L. C. Brandão, A. L. Diniz, D. D. J. Penna, "Análise dos valores da água, operação do sistema e cálculo de preços do SIN com a modelagem individualizada dos reservatórios no planejamento de médio/longo prazos",," em *XXVII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Brasília, 2023.
- [5] C. B. Cruz, L. C. Brandão e A. L. Diniz, "Water values and marginal costs for power generation planning under more restrictive constraints and a more detailed representation of hydro plants," *Electric Power Systems Research (special issue of the XXIII Power Systems Computation Conference, Paris, France)*, p. (to appear), 2024.
- [6] L. C. Brandão, C. A. Araujo Jr, A. L. Diniz e B. Dias, "Analytical computation of marginal values for hydro generation for mid/long-term planning," em *Hydropower scheduling conference*, Oslo, Norway, 2022.
- [7] D. Bertsimas e J. N. Tsitsiklis, *Introduction to Linear Optimization*, 1997.
- [8] T. N. Santos e A. L. Diniz, "Feasibility and optimality cuts for the multi-stage Benders decomposition approach: application to the network constrained hydrothermal scheduling," em *2009 IEEE PES General Meeting*, Calgary, Canada, 2009.
- [9] 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.
- [10] M. E. Maceira, "Programação Dinâmica Dual Estocástica Aplicada ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos com Representação do Processo Estocástico de Afluências por Modelos Auto-Regressivos Periódicos," Relatório Técnico CEPEL 237/93, 1993.
- [11] M. V. F. Pereira, "Optimal stochastic operations scheduling of large hydroelectric systems," *Int. Journ. Of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 11, nº 3, pp. 161-169, 1989.
- [12] M. E. Maceira, A. C. Melo, J. F. Pessanha, C. B. Cruz, V. A. Almeida e T. C. Justino, "Uma Abordagem para a Representação das Incertezas da Fonte de Geração Eólica no Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos-Modelo NEWAVE-Relatório Final," Relatório Técnico CEPEL 3872/2021, 2021.