

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

GT Metodologia

Procedimento de aumento da eficiência computacional do modelo NEWAVE

Sumário

1. Apresentação	3
2. Introdução	4
3. Metodologia	6
3.1. Avaliação da qualidade da política.....	8
3.2. Calibração dos parâmetros	8
3.3. Desempenho da estratégia	9
3.4. Aprimoramentos e desenvolvimentos futuros	10
4. Sensibilidades.....	11
4.1. Análise do Custo Total de Operação	13
4.2. Análise das Funções de Custo Futuro no Primeiro Período do Horizonte de Planejamento.....	14
4.3. Análise das Funções de Custo Futuro em Períodos dos anos 2017, 2018 e 2021 ..	16
4.4. Análise do ZINF	18
4.5. Análise do CMO no Primeiro Período	21
4.6. Análise da seleção de cortes ao longo da construção da política.....	23
4.7. Tempo Computacional	28
4.8. Topologia com 12 REEs	30
4.9. Análise das características operativas.....	31
4.9.1. Resultados modelo NEWAVE - PLD Maio/2017 topologia 12 REEs.....	31
4.9.2. Resultados modelo DECOMP - PLD Maio/2017 topologia 12 REEs	33
4.9.3. Resultados modelo NEWAVE - PLD Maio/2017 topologia 9 REEs	34
4.9.4. Resultados modelo DECOMP - PLD Maio/2017 topologia 9 REEs.....	36
4.9.5. Resultados modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016 topologia 9 REEs...	37
4.9.6. Resultados modelo DECOMP - PLD Dezembro/2016 topologia 9 REEs ...	38
4.9.7. Resultados modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016 topologia 12 REEs.	39
4.9.8. Resultados modelo DECOMP - PLD Dezembro/2016 topologia 12 REEs .	41
4.9.9. Tempo de processamento	42
5. Conclusão	46
6. Recomendações	46
7. Referências.....	47

1. Apresentação

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

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

2. Introdução

O tempo de processamento dos modelos computacionais de otimização energética é um fator relevante nos processos de planejamento da operação energética e formação de preço de liquidação das diferenças. No limite, aprimoramentos em parâmetros/funcionalidades nos modelos que permitiriam melhorar o detalhamento das características do sistema podem ser inviabilizados em função de um elevado custo computacional. Por exemplo:

a. Representação da diversidade hidrológica:

No Relatório Técnico Avaliação da Representação do SIN em Reservatórios Equivalentes de Energia – REE (2015) está expresso que, dentre as topologias avaliadas, a que melhor representa o sistema é uma com 12 REEs (denominada topologia “G”). No entanto, esta topologia apresentou um custo computacional que a tornou inviável do ponto de vista de aplicação nos processos do Programa Mensal de Operação e formação do Preço de Liquidação das Diferenças. Dessa forma, a CPAMP recomendou que a topologia “G” (com 12 REEs) seja aplicada após aperfeiçoamentos nos programas computacionais que reduzam os tempos de processamento a níveis adequados a esses processos. Assim, a metodologia adotada foi uma com 9 REEs (denominada topologia “D3”), que apresentou a melhor relação ganho para a representação da diversidade hidrológica e custo computacional aceitável para as atividades de PMO, PLD e Garantia Física de Energia. Essas topologias estão representadas graficamente nas figuras a seguir.

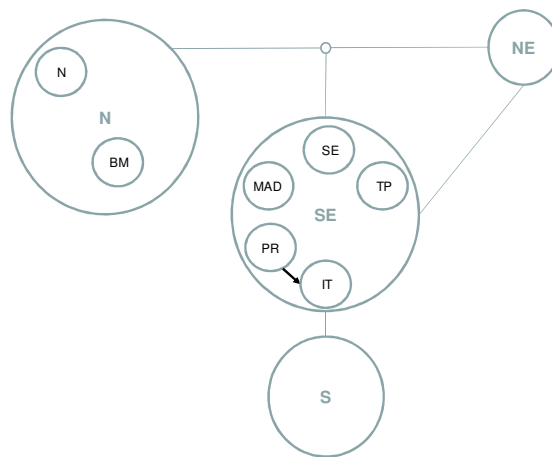


Figura 1 – Topologia D3 [4 x 9]

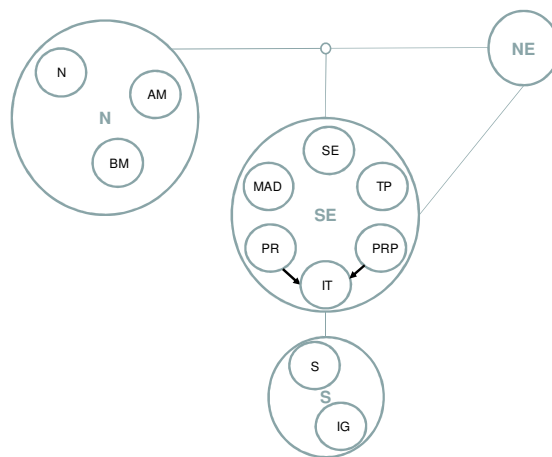


Figura 2 - Topologia G [4 X12]

- b. Superfície de Aversão ao Risco - SAR
- c. Revisão do número de patamares de carga
- d. Revisão do número de séries *backward* e *forward*
- e. Representação das usinas hidrelétricas de forma individualizada
- f. Representação das incertezas de outras fontes além da hidrelétrica

3. Metodologia

Apresenta-se a seguir um resumo da metodologia de seleção de cortes proposta pelo CEPEL e descrita com detalhes no relatório técnico [1]. Essa estratégia, denominada Seleção de Cortes (SC), foi desenvolvida com base em experiências na adição de outros tipos de restrições de forma iterativa em problemas de coordenação hidrotérmica, como na modelagem dinâmica da função de produção no modelo DECOMP [1] e nas aproximações lineares por partes para modelagem das perdas nos circuitos da rede elétrica no modelo DESSEM [2]. Ressalta-se que são reportadas na literatura outras aplicações de estratégias similares de seleção de cortes de Benders para a função de custo futuro, como em [4] e [5].

Resumidamente, a estratégia SC consiste de dois passos, ao se resolver cada subproblema (PL) de determinada série, abertura, período e iteração da estratégia de solução de programação dinâmica dual estocástica (PDDE):

- **definição de um conjunto inicial de cortes que devem ser incluídos inicialmente no PL:** para cada série (estado) *forward* e cada iteração da PDDE, consideram-se inicialmente apenas os cortes que se tornaram ativos em todos os subproblemas *backward* associados a esse estado, nas k_2 iterações anteriores da PDDE, onde k_2 é um parâmetro. Este conjunto de busca de cortes ativos é limitado aos cortes construídos nas k_1 iterações anteriores da PDDE, onde k_1 é a “janela” que define os cortes de Benders passados que são mantidos para verificação, já que os cortes “antigos” são descartados de forma definitiva¹.
- **execução de um processo iterativo para resolução do PL,** onde são inseridos, de forma paulatina e controlada, cortes não incluídos anteriormente, mas que se mostraram necessários quando comparados à solução anterior do PL. Em cada iteração do processo SC para resolver determinado subproblema, incluem-se apenas os n cortes que, quando avaliados para o vetor x (argumento da função de custo futuro) correspondente à solução da última resolução do PL, tenham apresentado os maiores valores de função de custo futuro e estes valores tenham sido superiores ao custo futuro do PL.

Evidentemente, o procedimento descrito acima só é eficaz se reduzir o tempo total para resolução de um PL, quando comparado à estratégia tradicional de incluir todos os cortes (denominada nesse relatório de Estratégia TC).

O processo de seleção de cortes está ilustrado na Figura 1, extraída de [3], onde se observam:

¹ Ressalta-se que $k_1 = 2 \times \text{NREE}$ é o valor considerado na versão 23 do modelo NEWAVE, onde NREE é o número de Reservatórios Equivalentes de Energia (REEs).

- à esquerda, o fluxograma do processo iterativo;
- no centro, uma representação esquemática do PL, contendo as restrições do problema e um subconjunto dos cortes da FCF, indicado em azul;
- abaixo do retângulo que representa o PL, o conjunto de cortes a serem testados, que não foram incluídos no PL na iteração corrente da estratégia SC. Dentre esses cortes, indicam-se na cor verde, os cortes candidatos que foram apontados como necessários para entrar no PL na próxima iteração;
- no lado direito, uma ilustração da FCF, contendo três tipos de corte: em azul, os cortes já incluídos no PL; em verde, os cortes a serem incluídos na próxima iteração, que não estão dominados na solução corrente; e em cinza, os demais cortes candidatos que não foram necessários serem incluídos.

Figura 3 Fluxograma do processo iterativo de seleção de cortes
(Fonte: [3]).

Na referência [3] é apresentada uma descrição mais detalhada desse processo iterativo, juntamente com um exemplo ilustrativo.

3.1. Avaliação da qualidade da política

Ressalta-se que essa estratégia SC consiste em um procedimento **exato**, onde os subproblemas de programação linear da PDDE são resolvidos **sem aproximações**. A diferença da estratégia SC em relação à estratégia tradicional TC de resolver os PLs de forma direta é que, na solução final de cada subproblema, o conjunto de cortes de Benders que foram adicionados ao PL na estratégia SC é muito menor do que o conjunto total de cortes, **porém os cortes não adicionados não promovem alteração no valor da solução ótima, por não estarem ativos**.

Entretanto, pelo fato de, estruturalmente, o PL da estratégia SC ser diferente do PL da estratégia TC, ambos podem levar a soluções equivalentes para determinado subproblema, i.e., ligeiramente diferentes porém de mesmo custo. Isto pode acarretar diferenças no processo iterativo da PDDE, já que o resultado de um subproblema alimenta as condições iniciais do problema do período seguinte. Porém, é importante observar que ambas as estratégias SC e TC levam a políticas operativas equivalentes do ponto de vista de qualidade, tendo em vista que o problema e o critério de parada são os mesmos entre as duas estratégias de solução.

3.2. Calibração dos parâmetros

Na implementação da estratégia SC, recomenda-se a aplicação de um valor $k_1 = 45$, de forma a nunca descartar cortes construídos em iterações antigas da PDDE. Isto garante que todos os cortes já construídos ao longo da PDDE são verificados na estratégia SC, assegurando a equivalência entre as estratégias SC e TC. Em relação aos demais parâmetros (k_2 e n), estes devem ser calibrados com o único objetivo de promover a maior redução possível de tempo computacional. Ressalta-se que esses parâmetros podem variar de acordo com o estudo, sejam eles PMO, PLD, PDE, PEN e Cálculo de Garantia Física.

Portanto, ressalta-se **que a definição de quaisquer valores para esses parâmetros não compromete o resultado da estratégia SC**, em termos de qualidade da política, apenas pode torná-lo mais ou menos eficiente do ponto de vista de desempenho computacional.

3.3. Desempenho da estratégia

Algumas características da implementação computacional da estratégia SC no problema de planejamento real do modelo NEWAVE a diferem de experiências anteriores dessa estratégia, reportadas em [4], [5]:

- O subproblema de programação linear no modelo NEWAVE é mais complexo, por incluir restrições como balanço hídrico controlável e a fio d'água, consideração de patamares de carga, restrições de vazão mínima, e restrições lineares por parte para perdas em usinas a fio d'água, por exemplo, que não são reportadas nos outros trabalhos. Além disso, a aplicação corrente contém 9 ou 12 reservatórios equivalentes de energia (REEs), ao passo que as outras aplicações consideravam apenas 4 REEs. O fato de se considerar um problema mais complexo reduz os ganhos relativos da estratégia SC, pois o “peso relativo” dos cortes na dificuldade em resolver o problema é menor.
- O modelo NEWAVE, na versão 23, já considera uma estratégia de recuperação de base para resolução de cada PL. Portanto, a resolução de cada subproblema na estratégia TC já é bastante eficiente, o que dificulta a obtenção de reduções mais expressivas de tempo computacional;
- O modelo NEWAVE considera uma sofisticada estratégia de paralelização, tanto nas etapas *forward* e *backward* do algoritmo de PDDE. Com isso, parte do tempo de execução é gasto com troca de informações entre processadores, que são largamente compensadas quando comparadas com a execução em serial, mas que fazem com que eventuais reduções no tempo de resolução dos PLs não se traduzam em um tempo tão elevado em termos de tempo de execução total para resolução do problema como um todo.

Os fatores mencionados acima tornam difícil a obtenção de reduções de tempo em ordens de magnitude expressivas, como por exemplo de 6 a 20 vezes, obtidos em experiência anterior do CEPEL na modelagem da função de produção dinâmica [2].

3.4. Aprimoramentos e desenvolvimentos futuros

A estratégia de seleção de cortes SC avaliada pela CPAMP foi implementada, no modelo NEWAVE, de forma concomitante à estratégia de eliminação de cortes redundantes² já existente até a versão 23 do modelo. Entretanto, pode-se obter ganhos adicionais de desempenho ao implementar uma estratégia mais sofisticada de eliminação de cortes dominados, conforme reportado em [6]. A estratégia proposta naquele trabalho foi avaliada pelo CEPEL em 2015, porém resultados preliminares apresentaram um tempo razoável de processamento para identificação dos cortes dominados, que não compensavam o ganho de tempo obtido na redução do tempo para resolver os PLs. Ressalta-se que o trabalho [6] considerou que as variáveis aleatórias são independentes temporalmente, desta forma os problemas de programação linear a serem resolvidos para eliminar os cortes no modelo NEWAVE contém um número muito maior de variáveis em relação àquele trabalho, devido aos eixos para as afluências passadas. Estes eixos trazem ainda uma dificuldade adicional pelo fato do seu domínio de valores ser, a princípio, ilimitado superiormente, o que reduz a quantidade de cortes identificados como dominados.

² São considerados cortes redundantes aqueles com os mesmos valores de coeficiente de um outro corte, porém com valor de termo independente (RHS) inferior)

4. Sensibilidades

A fim de averiguar se a metodologia descrita anteriormente gera soluções equivalentes no NEWAVE, foram analisados o custo total de operação – item 4.1, a função objetivo em 50 cenários visitados (energia natural afluyente, armazenamento, despacho antecipado de GNL) na simulação final no caso com todos os cortes – itens 4.2 e 4.3, o ZINF (valor estimado do custo total de operação) – item 4.4, custo marginal de operação médio do primeiro período – item 4.5, e. Já, o item 4.6 verifica os resultados do mecanismo de seleção de cortes ao longo do processo iterativo da PDDE, analisando o relatório detalhado deste mecanismo disponibilizado pelo NEWAVE. Ressalta-se que as análises a serem apresentadas consideraram, para avaliação das políticas operativas construídas com cada estratégia, uma amostra do conjunto global de cenários. A abordagem adotada (amostral) é coerente com a classe de algoritmos de solução da PDDE e o número de cenários adotados, em geral 50, permitiu realizar diversos testes e extrair importantes conclusões, sem perda de generalidade.

Adicionalmente, são apresentados o tempo computacional das simulações – item 4.7, a comparação entre as topologias com 9 REEs (vigente) e com 12 REEs, com o objetivo de avaliar se o ganho de tempo computacional obtido com a implementação da metodologia de seleção de cortes viabiliza a representação da topologia mais detalhada - item 4.8., e uma análise das características operativas de casos de PMO/PLD com os modelos NEWAVE e DECOMP – item 4.9.

Destaca-se que simples mudanças no deck de dados, podem gerar soluções equivalentes em termos de custo total de operação, mas com decisões operativas distintas. Ao aplicar a seleção de cortes, a solução do PL para um determinado estágio pode ser diferente do caso com todos os cortes. Dessa forma, o próximo estágio partirá de outra solução. Assim, não se espera que os casos com seleção de cortes produzam resultados iguais ao caso com todos os cortes, mas os casos com seleção de cortes devem obter soluções equivalentes ao caso com todos os cortes, independente dos parâmetros escolhidos (iteração inicial X, k2 janela de cortes ativos para solução inicial, número de cortes adicionados para incremento no processo de seleção de cortes nadic, neste item denominados por SC_X_K2_nadic).

A seguir são apresentados resultados dos decks de PMO/PLD e de PDE. Em todos os decks analisados se observa que independente da parametrização escolhida para a seleção de cortes os custos totais de operação são estatisticamente iguais ao caso com todos os cortes.

Para avaliar a eficácia da metodologia escolheram-se aleatoriamente possíveis parâmetros. Além disso, com objetivo de gerar uma solução equivalente ao caso com todos os cortes, denominado por TC, provocou-se uma perturbação inserindo 1 MW médio na carga de energia elétrica do subsistema Norte no primeiro mês de estudo, TC'. Como os casos com seleção de cortes podem apresentar soluções diferentes, podem convergir em iterações distintas. Visando compará-los, primeiro os casos foram executados até atingirem o critério de convergência e posteriormente os casos foram executados novamente fixando a iteração de parada da otimização considerando a maior iteração observada entre eles.

4.1. Análise do Custo Total de Operação

Observa-se em todos os decks analisados que os casos com seleção de cortes (SC) apresentam soluções de mesmo custo total de operação que o caso com todos os cortes (TC) e o caso com todos os cortes perturbado (TC'), considerando o intervalo de confiança de 95%.

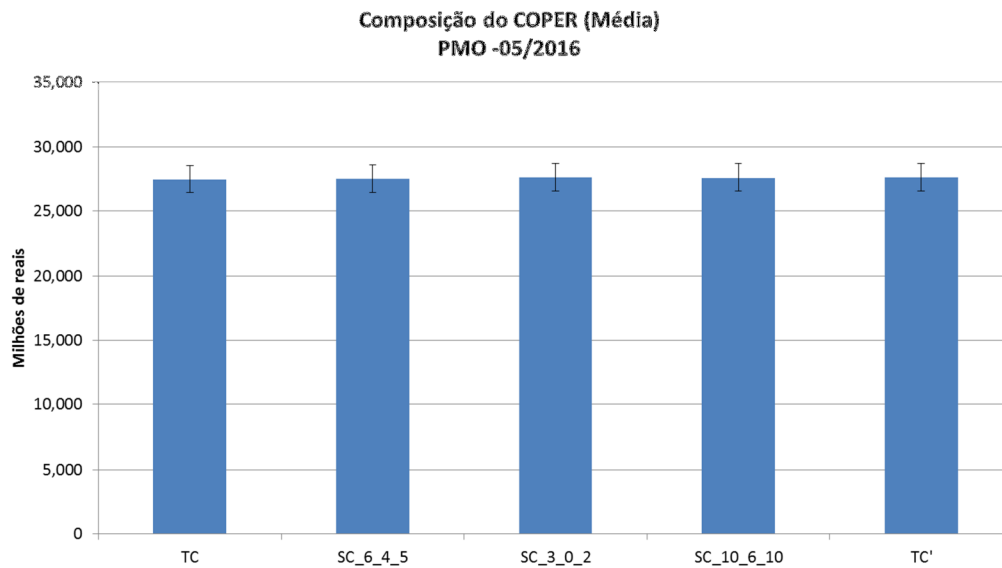


Figura 4 Custo de operação das sensibilidades com o PMO de 05/2016.

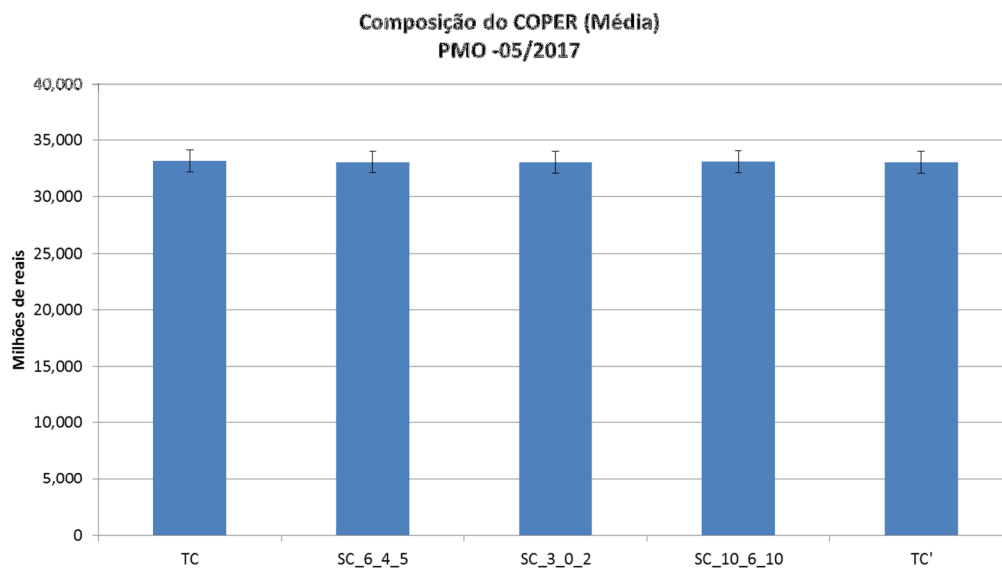


Figura 5 Custo de operação das sensibilidades com o PMO de 05/2017.

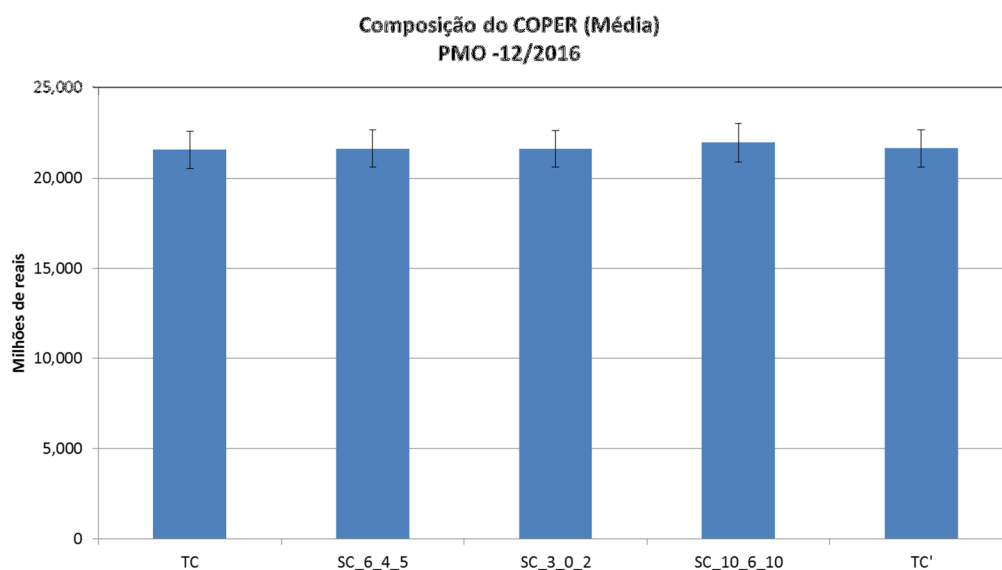


Figura 6 Custo de operação das sensibilidades com o PMO 12/2016.

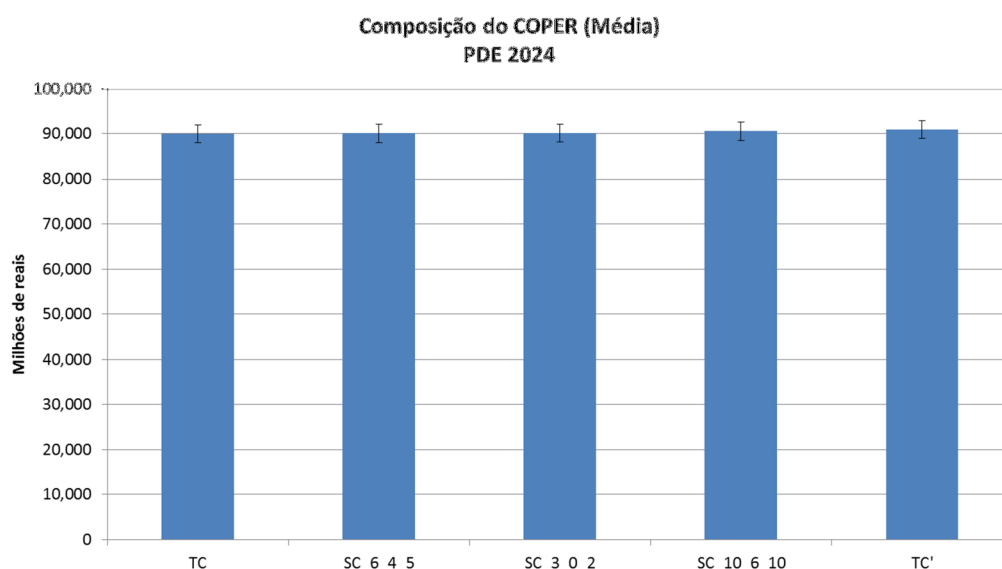


Figura 7 Custo de operação das sensibilidades com o PDE 2024.

4.2. Análise das Funções de Custo Futuro no Primeiro Período do Horizonte de Planejamento

Os casos com seleção de cortes (SC) podem encontrar soluções distintas do caso com todos os cortes (TC) a cada estágio e à medida que se afasta do início do horizonte de planejamento as diferenças aumentam em módulo. Assim, foram analisadas as variações dos valores de função objetivo obtidos com as distintas funções de custo futuro (cada uma delas construída considerando uma das 5 variações: TC, SC-6-4-5, SC-3-0-2, SC-10-6-10 e TC') no primeiro

período cujos resultados são apresentados nesse item e no próximo item são mostrados os resultados para períodos mais à frente no horizonte de planejamento. Ressalta-se que os 50 cenários visitados foram escolhidos de forma aleatória e por isso não compõem uma série temporal, o formato do gráfico da variação da função de custo futuro e CMO utilizam linhas com propósito de facilitar a visualização.

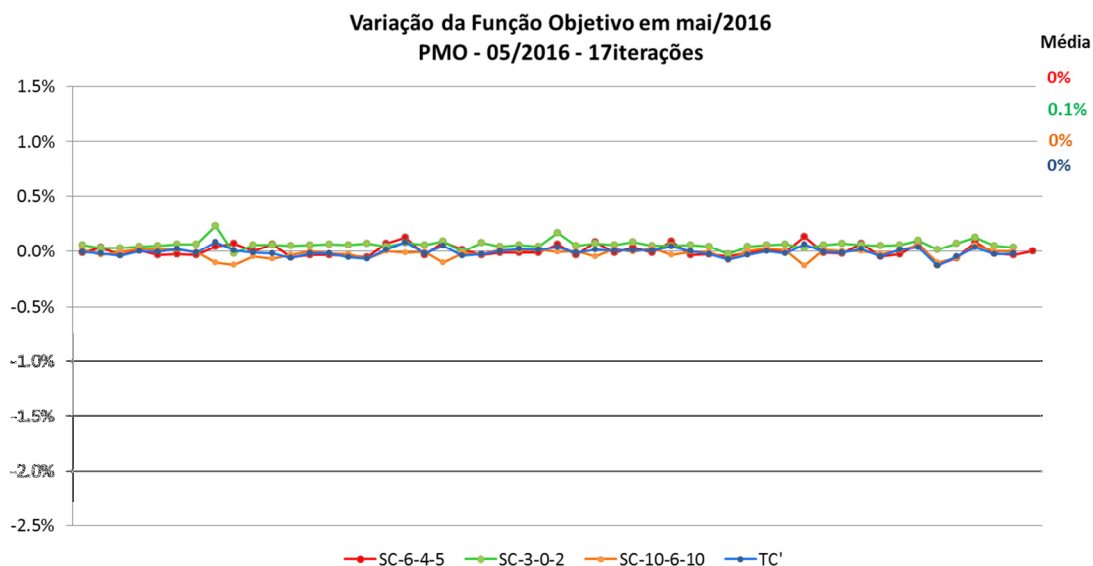


Figura 8 Variação da Função objetivo no primeiro período nos 50 estados visitados no PMO 05/2016.

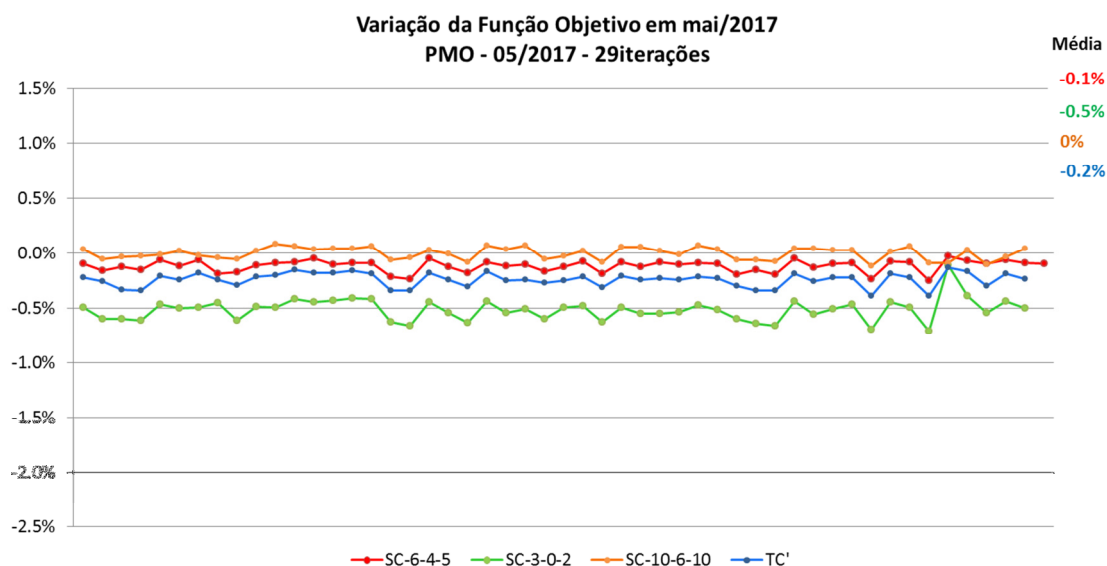


Figura 9 Variação da Função objetivo no primeiro período nos 50 estados visitados no PMO 05/2017.

Para mensurar as variações atualmente praticadas no NEWAVE, rodou-se o caso TC' que é o caso com todos os cortes com uma perturbação de 1MW médio na carga do Norte no primeiro período, com intuito de que o problema de programação linear obtivesse uma outra solução que fosse equivalente a do caso original.

Considerando um determinado conjunto de parâmetros não se verifica tendência de aumento/redução da função de custo futuro, por exemplo, o caso SC-3-0-2 no PMO 05/2017 apresenta para os 50 cenários visitados variação da função objetivo em média de -0,5%, já no PMO 12/2016 a variação média é de 0,4%.

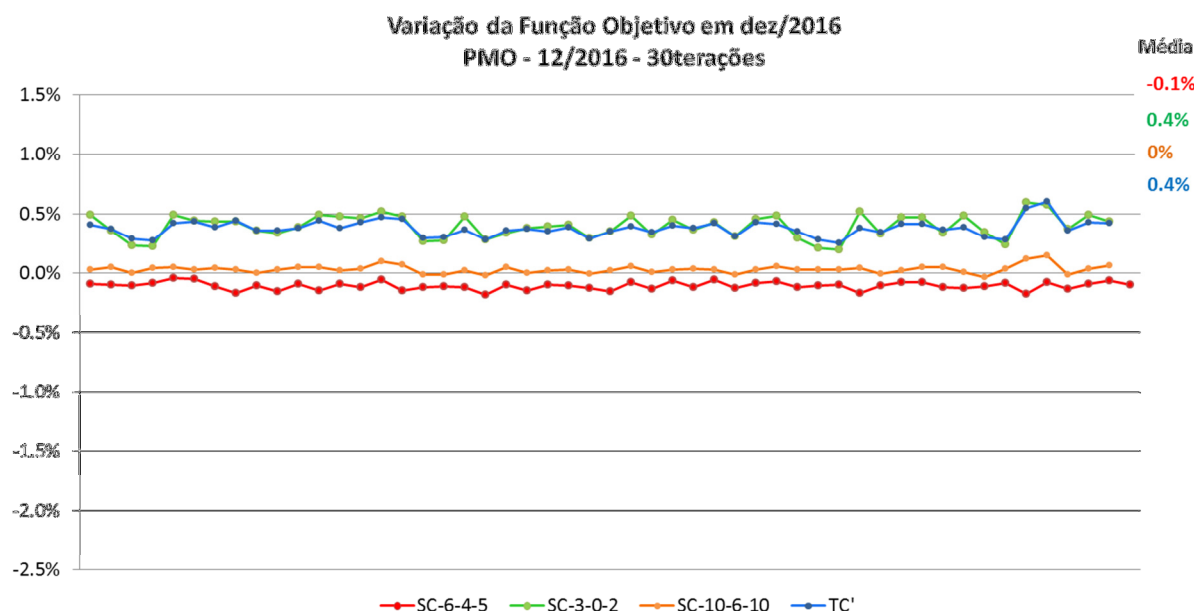


Figura 10 Variação da Função objetivo no primeiro período nos 50 estados visitados no PMO 12/2016.

O gráfico para o PDE 2024 não foi gerado para o primeiro período pois é rodado sem tendência hidrológica, dessa forma para consultar as últimas 11 afluências para cada REE e cada série seria necessário ler o arquivo binário energiaf.

4.3. Análise das Funções de Custo Futuro em Períodos dos anos 2017, 2018 e 2021

Nota-se nos casos em estudo que o módulo da média das variações da função de custo futuro no primeiro período do horizonte de planejamento é menor que 0,5%. Conforme o esperado e já comentado anteriormente, as variações apresentadas nos períodos seguintes são maiores que as observadas no primeiro.

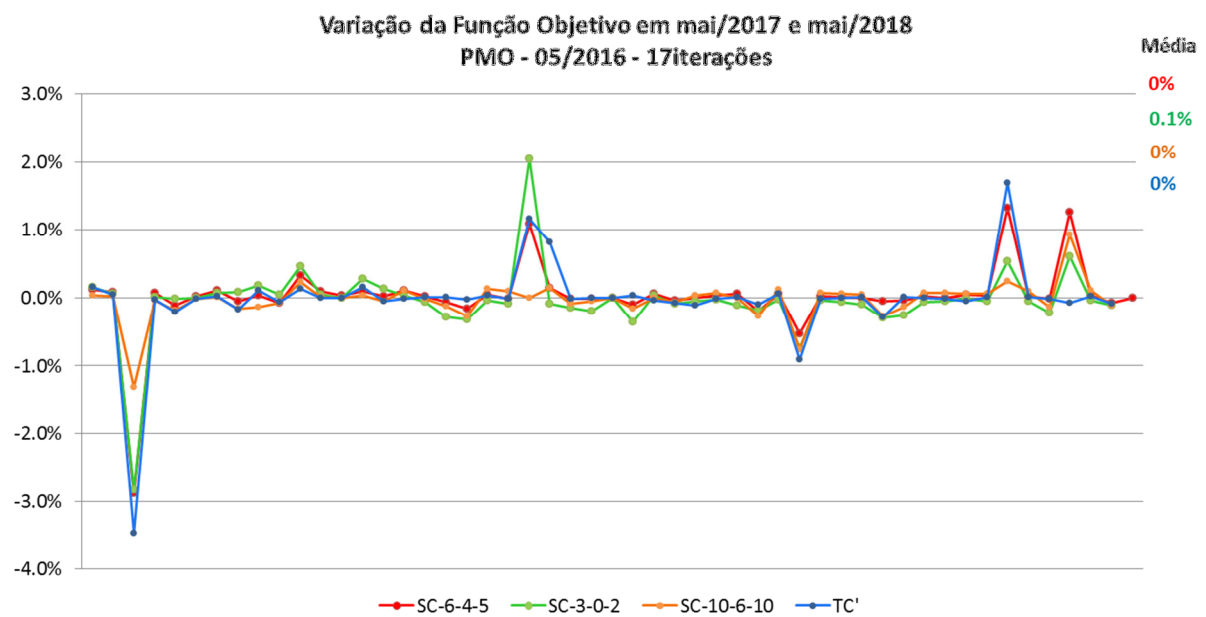


Figura 11 Variação da Função objetivo nos 50 estados visitados em 2017 e 2018 do PMO 05/2016.

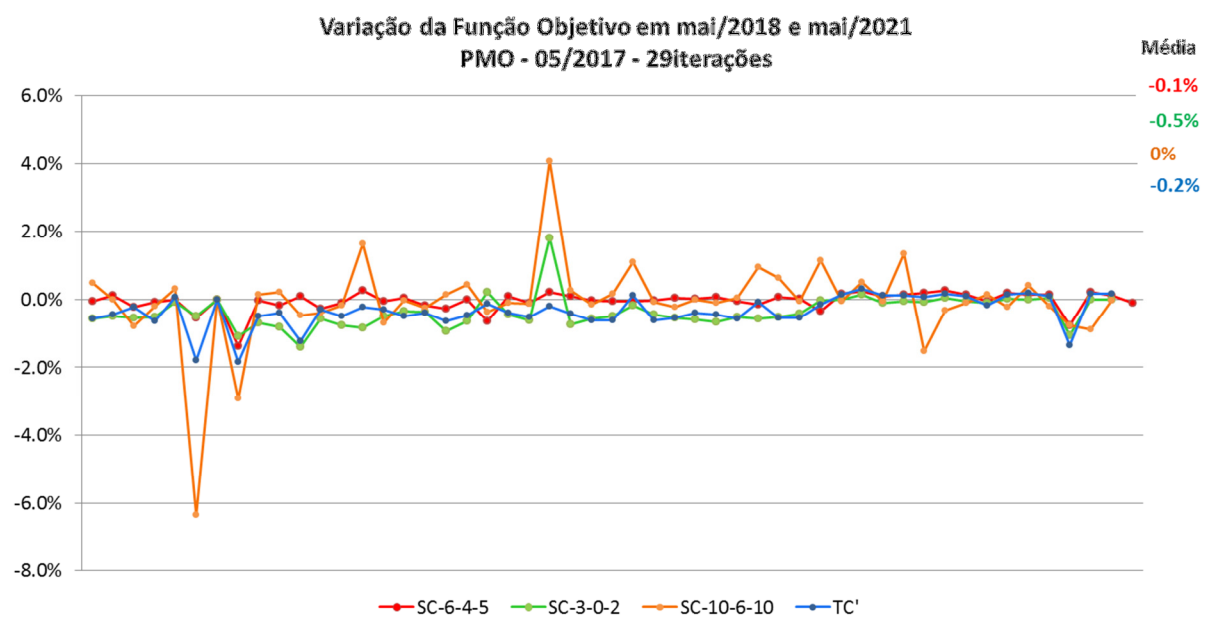


Figura 12 Variação da Função objetivo nos 50 estados visitados em 2017 e 2021 do PMO 05/2017.

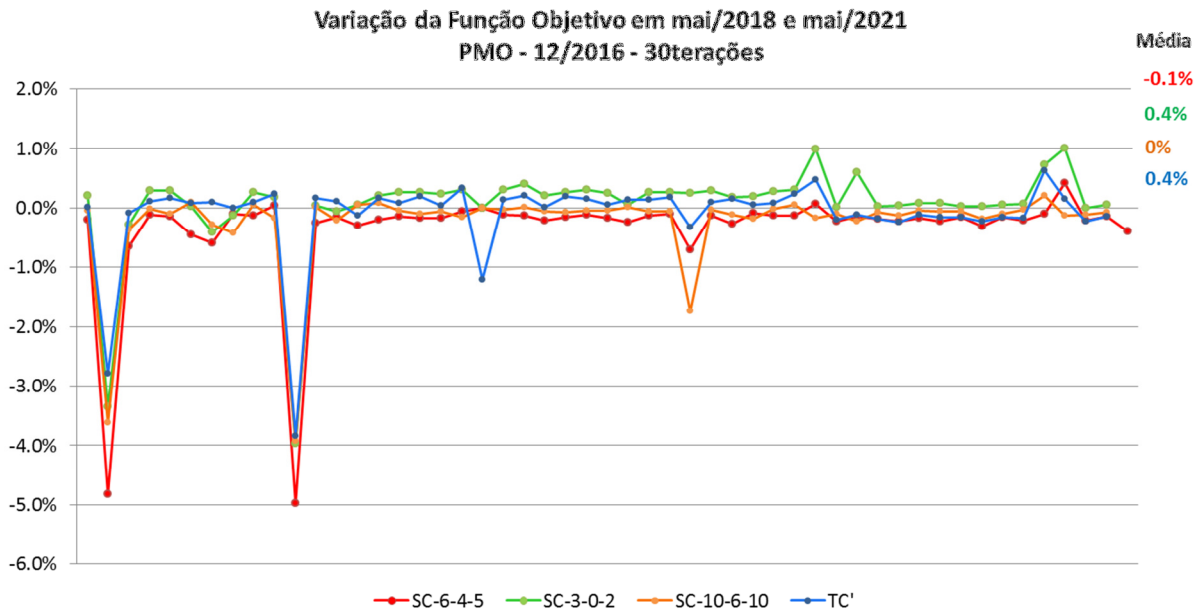


Figura 13 Variação da Função objetivo nos 50 estados visitados em 2018 e 2021 do PMO 12/2016.

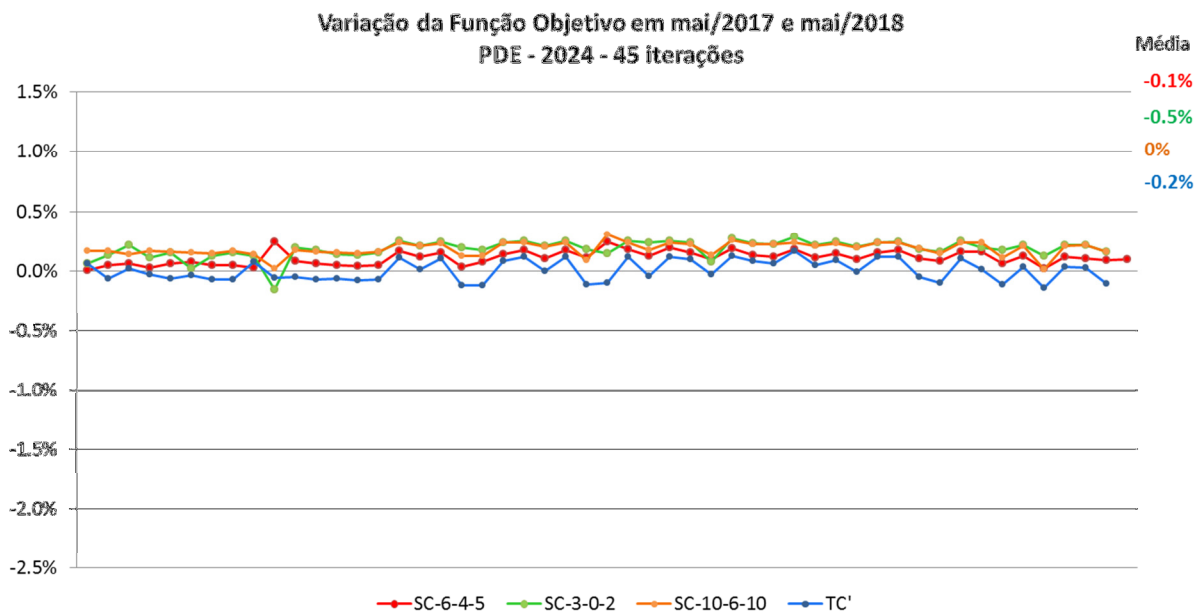


Figura 14 Variação da Função objetivo nos 50 estados visitados em 2017 e 2018 do PDE 2024.

4.4. Análise do ZINF

Com intuito de verificar se os casos haviam convergido de acordo com o critério de estabilidade do ZINF (valor estimado do custo total de operação), mostra-se a seguir o ZINF para cada iteração e na direita a variação da última iteração.

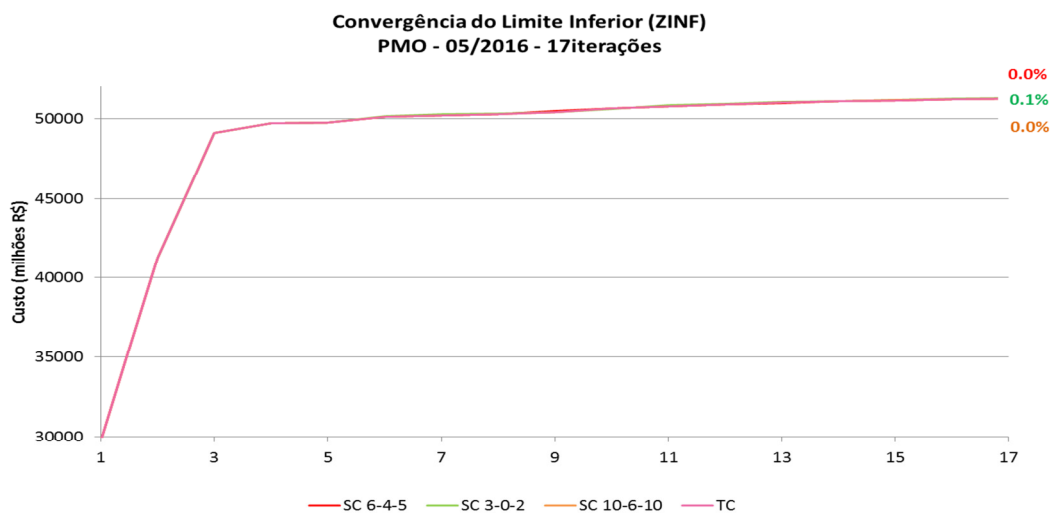


Figura 15 Convergência do PMO 05/2016 considerando a maior iteração entre as sensibilidade.

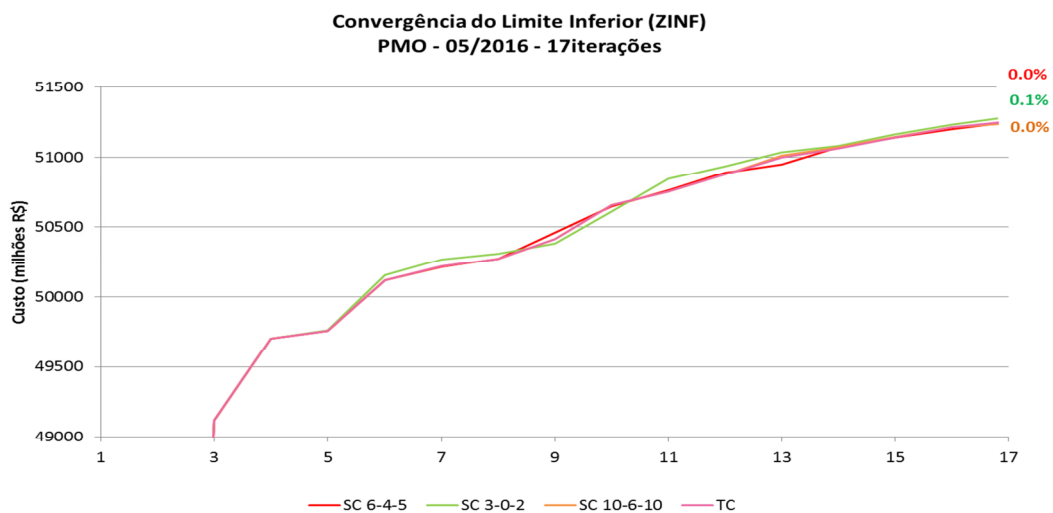


Figura 16 Convergência do PMO 05/2016 - Zoom.

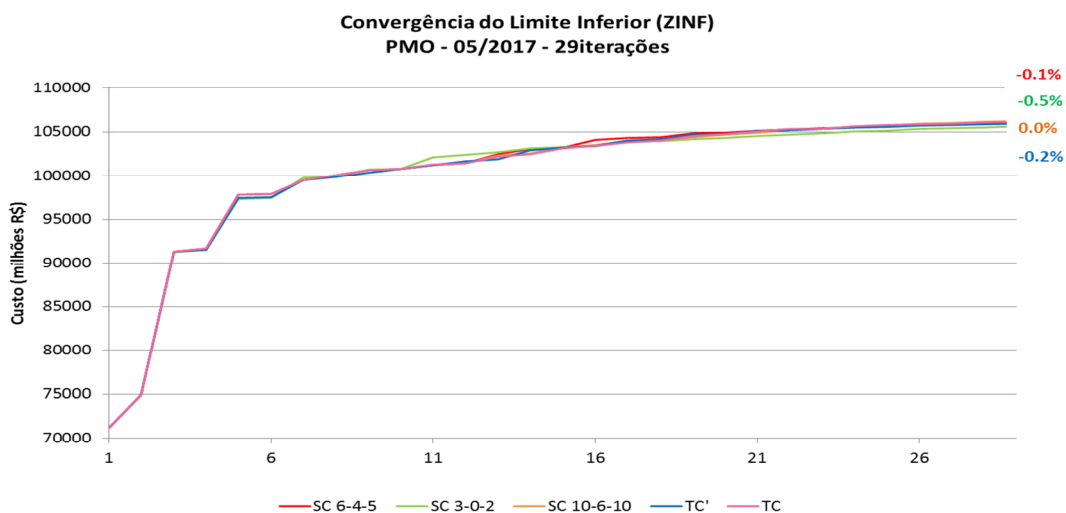


Figura 17 Convergência do PMO 05/2017 considerando a maior iteração entre as sensibilidade.

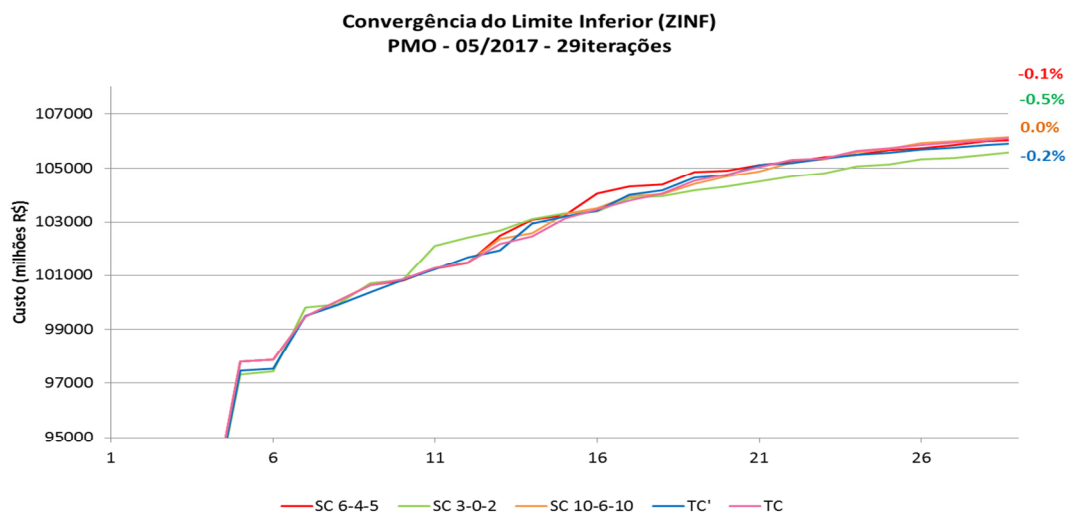


Figura 18 Convergência do PMO 05/2017 - Zoom.

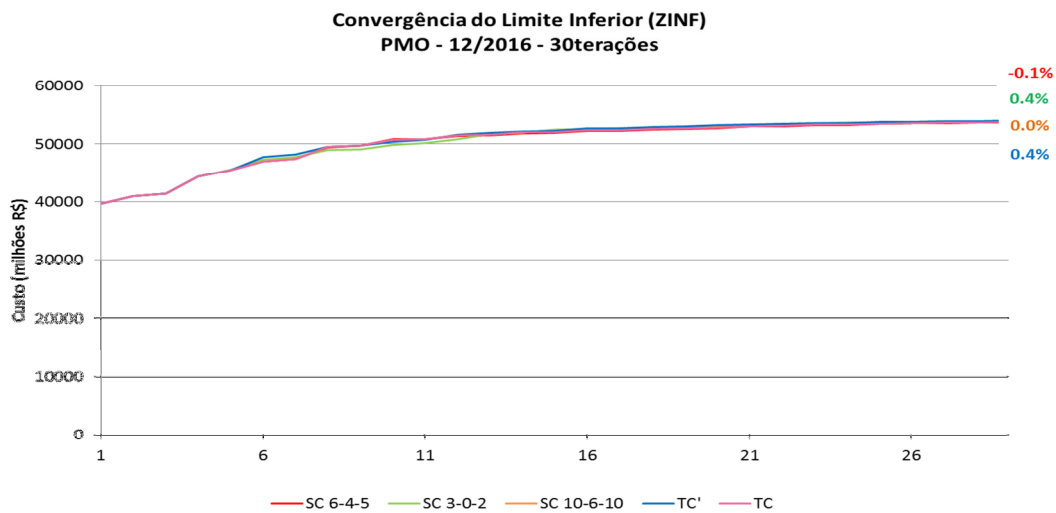


Figura 19 Convergência do PMO 12/2016 considerando a maior iteração entre as sensibilidades.

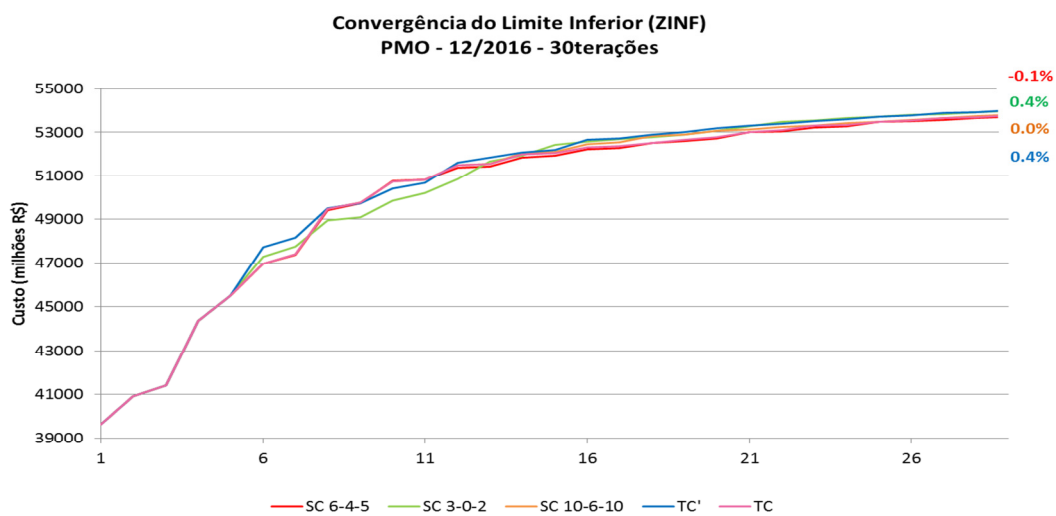


Figura 20 Convergência do PMO 12/2016 - Zoom.

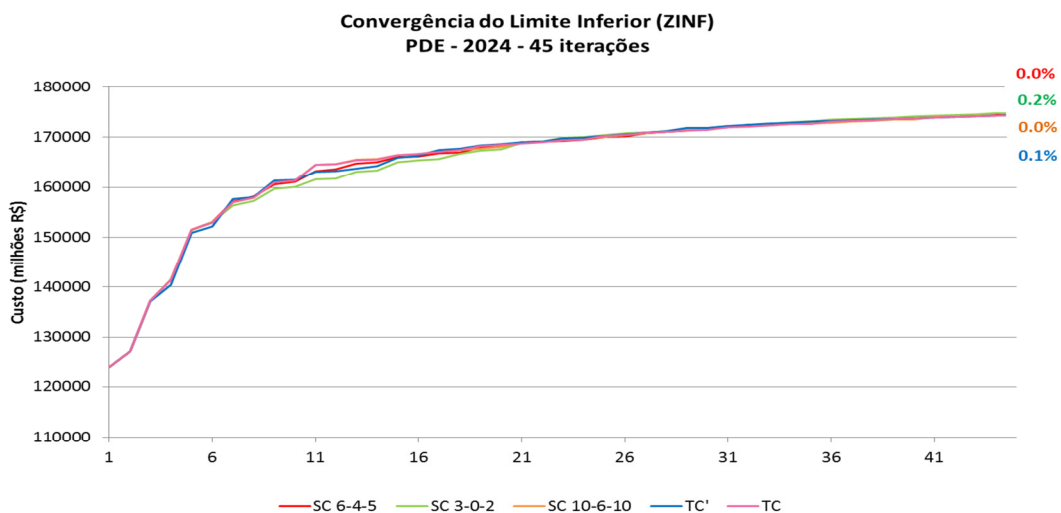


Figura 21 Convergência do PDE 2024 considerando a maior iteração entre as sensibilidades.

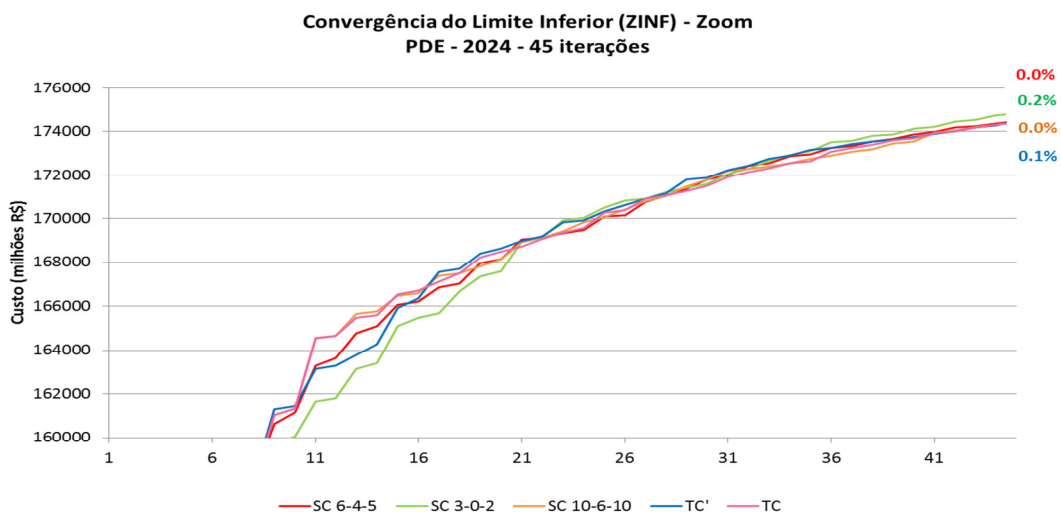


Figura 22 Convergência do PMO 12/2016 - Zoom.

4.5. Análise do CMO no Primeiro Período

Para observar o impacto do uso da seleção de cortes serão mostrados resultados do custo marginal de operação do primeiro mês do horizonte de planejamento. Nos casos analisados geralmente se observa variações de CMO menores que 10%, quando ocorrem variações elevadas a diferença em termos absolutos é pequena, por exemplo, no PMO de 05/2016 para um cenário há variação superior a 50%, o valor absoluto do CMO no caso TC era de R\$ 13,02 e os casos com seleção de cortes obtiveram CMO por volta de R\$ 30,00.

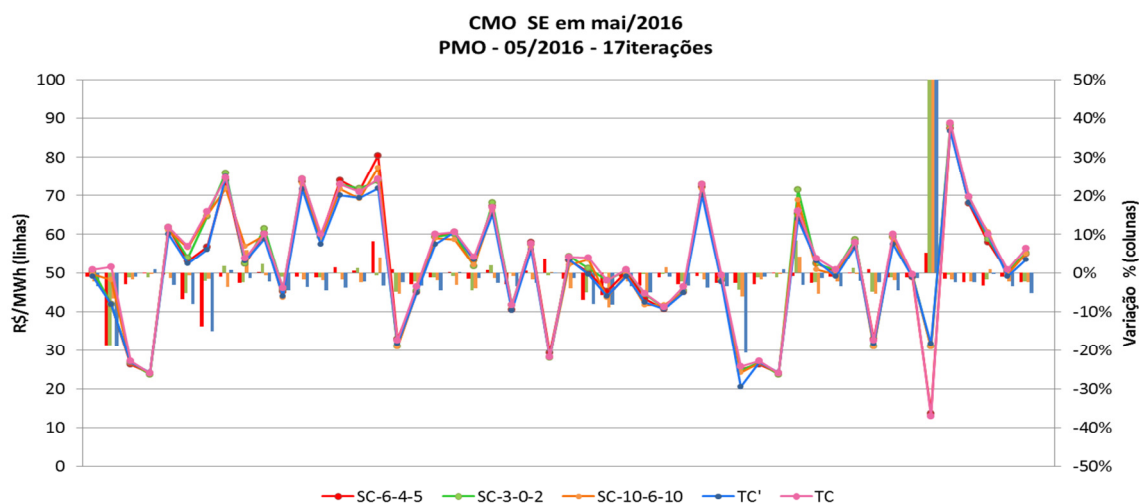


Figura 23 Custo marginal médio do primeiro mês subsistema sudeste das sensibilidades no PMO de 05/2016.

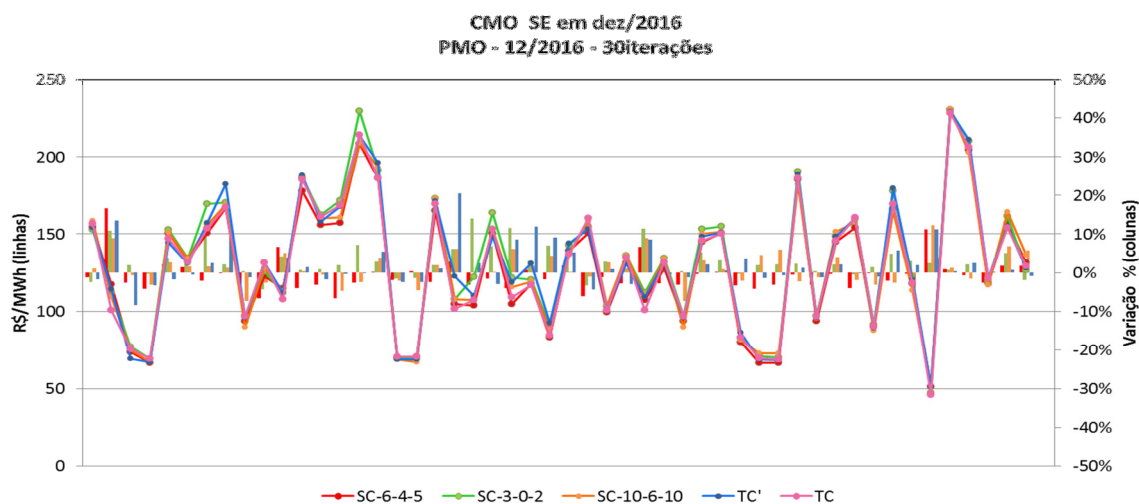


Figura 24 Custo marginal médio do primeiro mês subsistema sudeste das sensibilidades no PMO de 12/2016.

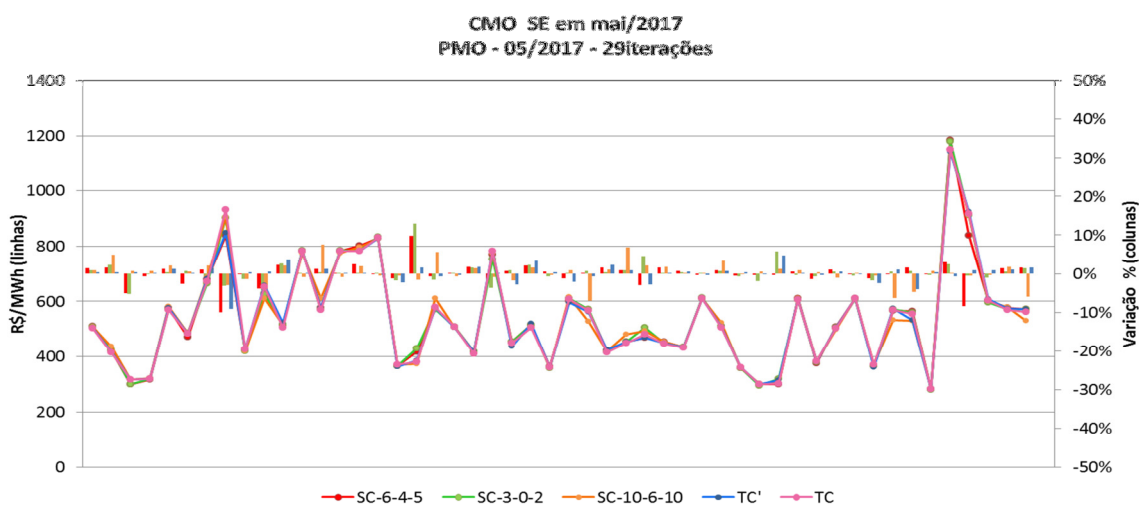


Figura 25 Custo marginal médio do primeiro mês subsistema sudeste das sensibilidades no PMO de 05/2017.

4.6. Análise da seleção de cortes ao longo da construção da política

A versão 23.1.3 do modelo NEWAVE disponibiliza um relatório de *log* que reporta os principais resultados obtidos na aplicação da seleção de cortes: função objetivo e cortes adicionados. Este relatório é de grande importância para validar o mecanismo implementado. A princípio, sugere-se comparar os resultados da função objetivo com e sem a utilização do mecanismo.

No entanto, o relatório é gerado apenas nas iterações da PDDE que utilizam a seleção de cortes. Portanto, a presente análise será efetuada em simulações nas quais o processo de seleção de cortes se inicia na mesma iteração. O caso de referência escolhido foi PMO de maio de 2017, sendo escolhido se iniciar a seleção de cortes a partir da segunda iteração e os seguintes parâmetros para o mecanismo:

- janela de cortes ativos (K2) 2 e 3 cortes adicionados (SC-2-2-3);
- janela de cortes ativos (K2) 3 e 5 cortes adicionados (SC-2-3-5);
- janela de cortes ativos (K2) 5 e 10 cortes adicionados (SC-2-5-10).

Nestas simulações esperam-se os seguintes resultados:

- no último estágio da primeira iteração em que se realiza a seleção de cortes a FO deve retornar o mesmo valor, sujeito apenas a precisão do solver;
- à medida que se avança no processo iterativo aumenta-se a dispersão das diferenças sem que haja tendência.

Os arquivos de relatório gerados, da iteração 2 a 10 totalizam cerca de 10Gb e representam mais de 4 milhões de pontos, cada um correspondendo a um problema de programação linear do processo *backward* de construção da função de custo futuro.

Portanto, para viabilizar a realização de uma análise que compreenda todos os períodos e iterações em questão, optou-se por reduzir o número de pontos avaliados para 50, sem perda de generalidade. Ressalta-se que as simulações consideraram 200 cenários *forward*, mas optou-se aqui por comparar os resultados de apenas um quarto da amostra total.

Os gráficos, por iteração, a seguir sempre apresentam as seguintes variáveis, ao longo de todos os períodos do processo *backward* (6 a 119):

- probabilidade de ocorrência de diferenças das funções objetivo entre as diferentes parametrizações da seleção de cortes;

- diferenças encontradas das funções objetivo,
 - máxima e mínima absolutos para a segunda iteração;
 - média relativa para as demais iterações.



Figura 26 Comparações de Função Objetivo na Iteração 2.

O primeiro conjunto de gráficos mostra a probabilidade de ocorrência de diferenças e seus **valores absolutos** ao longo dos períodos, **na segunda iteração**. Observa-se que na maioria dos períodos não se registra qualquer ocorrência de diferenças.

Nesta iteração é **esperado** que os resultados do último período (119) sejam idênticos, respeitando-se a precisão do solver. Observa-se que ao se comparar os três casos **não se observou qualquer diferença** de resultado no último período.

Adicionalmente, observa-se que nesta iteração as máximas (positivas) e mínimas (negativas) diferenças absolutas se limitam na ordem de grandeza de 10^{-8} .

De forma a verificar se as diferenças se acentuam ao longo das iterações, serão apresentados os resultados de diferenças médias relativas em iterações subsequentes. A próxima sequência de gráficos mostra as ocorrências de **diferenças relativas** e valores médios na terceira iteração.

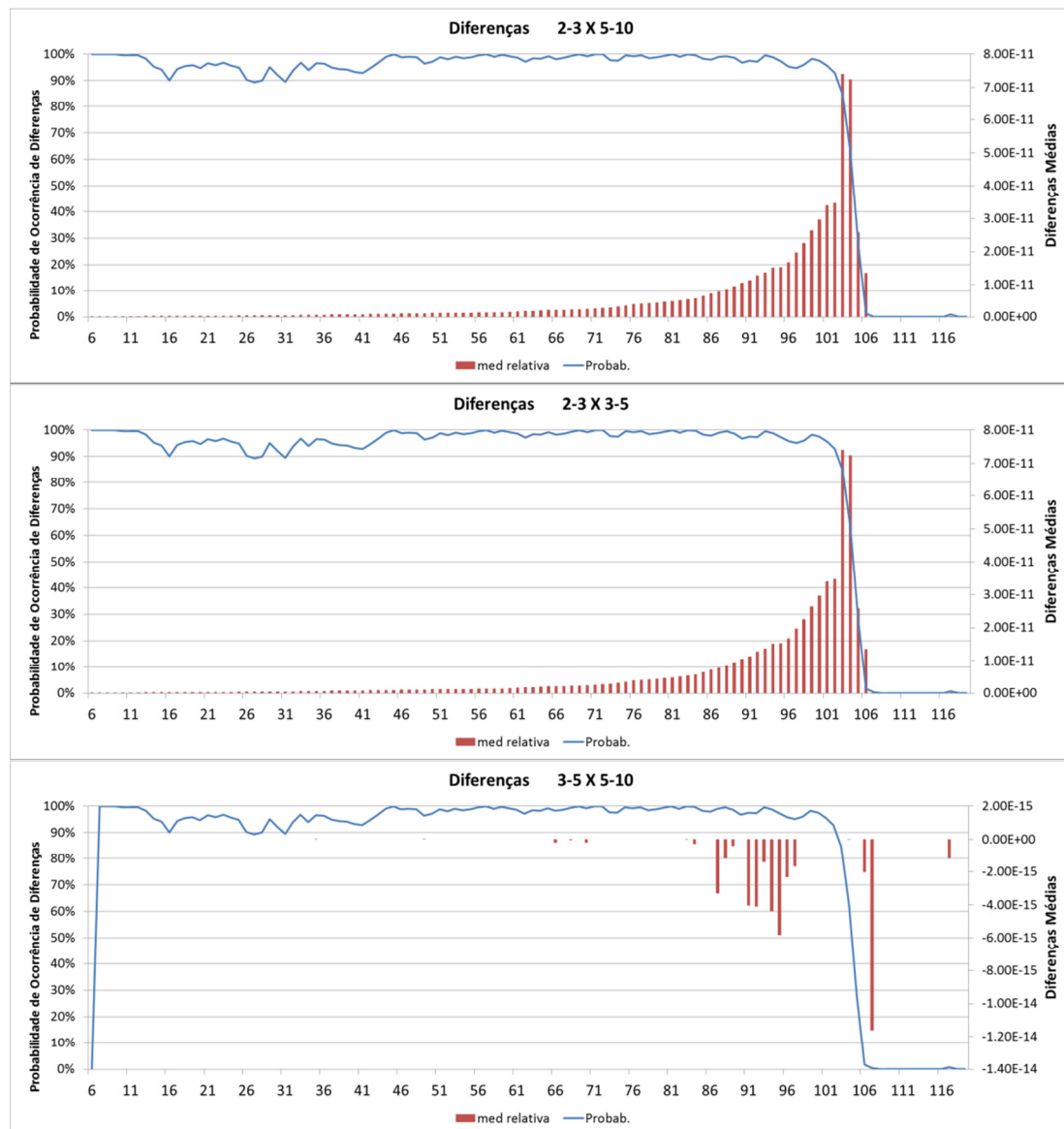


Figura 27 Comparações de Função Objetivo na Iteração 3.

Os resultados acima apresentados mostram que as diferenças ocorrem a partir do período 107, sendo que as diferenças **médias relativas** se encontram no máximo na grandeza de 10^{-11} .

A próxima sequência de gráficos apresenta as diferenças relativas na iteração 5.

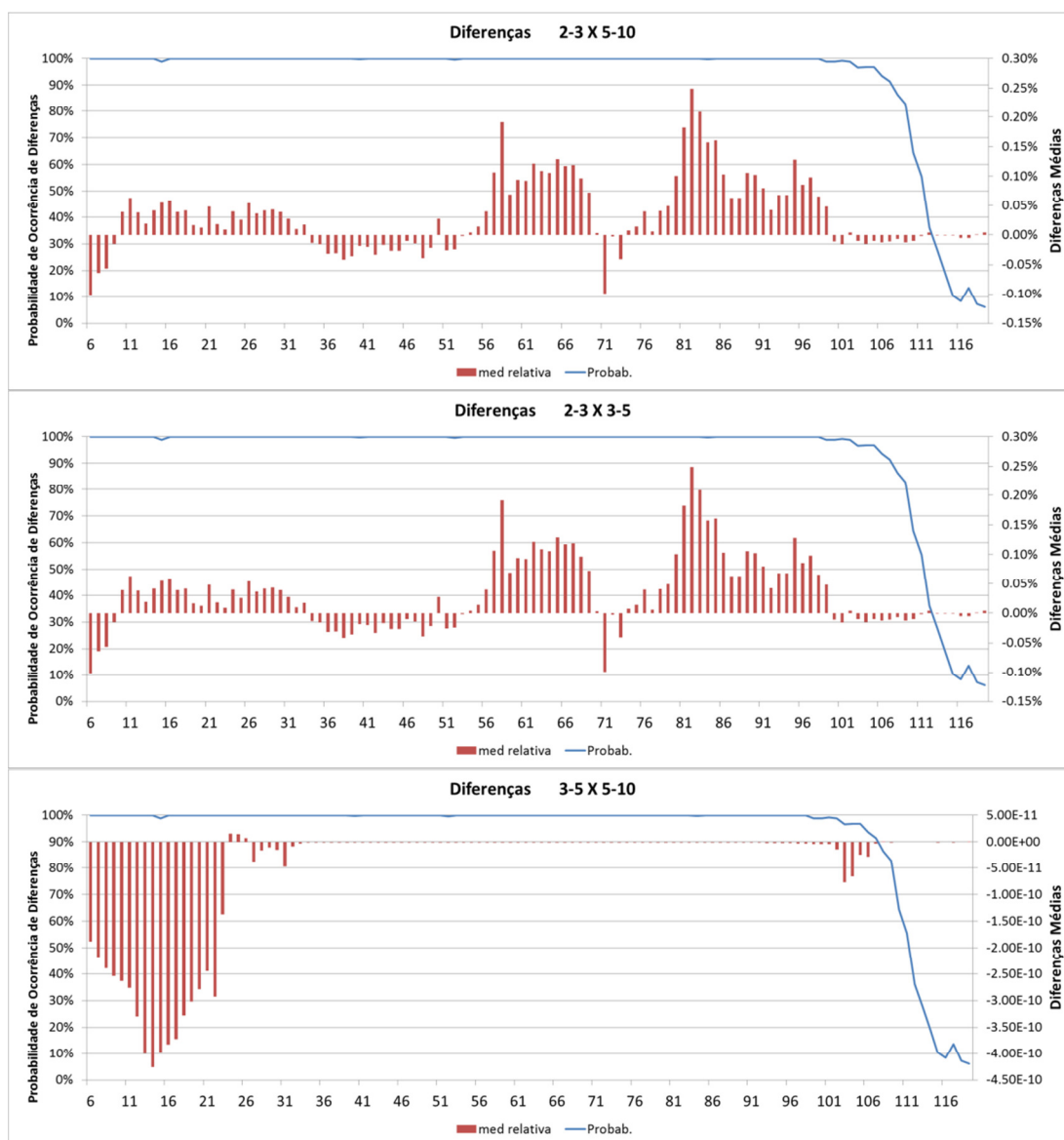


Figura 28 Comparações de Função Objetivo na Iteração 5.

Na iteração 5 ocorrem diferenças já no último estágio (7% dos cenários). Em termos médios relativos o caso 2-3 diverge em até 0,25% das outras duas parametrizações, que entre si divergem de forma relativa na ordem de 10^{-10} .

Por último, é apresentada a sequência de gráficos de diferenças relativas na iteração 10.

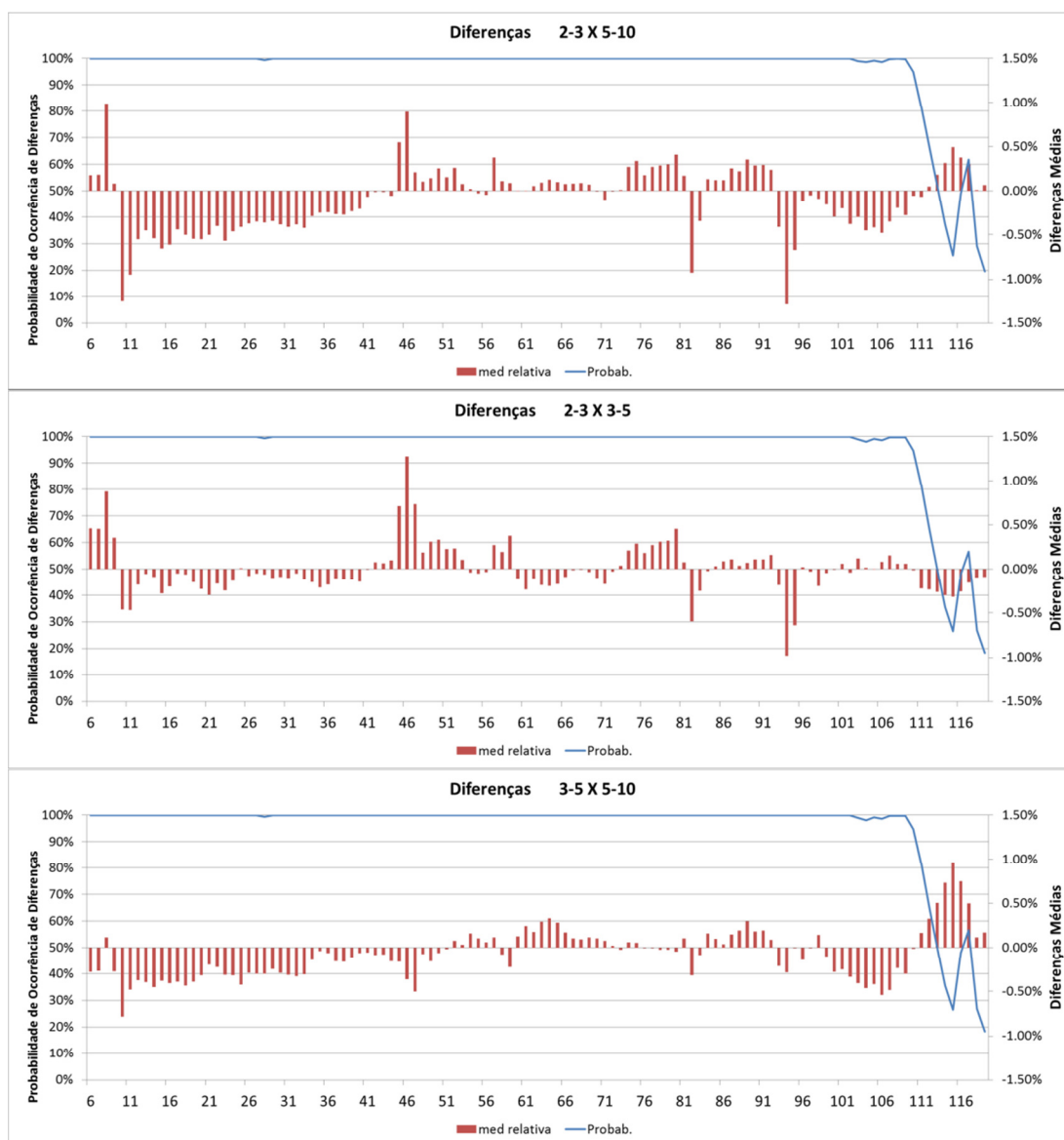


Figura 29 Comparações de Função Objetivo na Iteração 10.

Na iteração 10, as diferenças dos três casos já ocorrem no último período, se igualando a 100% dos cenários a partir do período 107. Observa-se que nesta iteração todas as diferenças médias relativas estão na mesma ordem de grandeza, o que ainda não ocorria nas iterações iniciais (3 e 5). Essas diferenças estão todas limitadas a 1,5%. Ressaltando-se que no primeiro período (comparável ao ZINF) as diferenças se limitam a 0,5%.

Desta forma, os resultados esperados foram obtidos, isto é, no último período da primeira iteração que realiza seleção de cortes as funções objetivo são idênticas, sendo que esta diferença se eleva ao longo do processo iterativo, pois as funções vão sendo construídas por caminhos cada vez mais distintos.

4.7. Tempo Computacional

Após avaliar a aplicação da metodologia, apresentam-se as reduções de tempo nos casos testados. Os gráficos mostram o tempo gasto para a execução completa de cada sensibilidade, e a distribuição entre as etapas de cálculo da política (parcela que se altera devido à seleção de cortes), simulação final, cálculos iniciais (por exemplo, calibração do modelo auto regressivo periódico), e leitura de dados (não visualizado devido à escala).

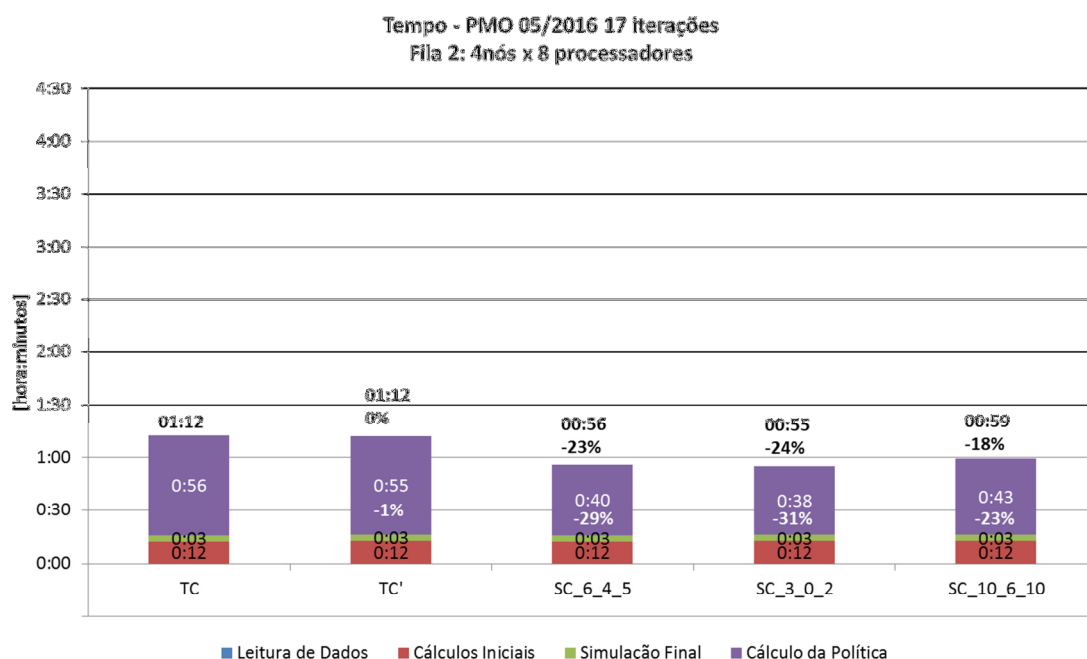


Figura 30 Tempo computacional das sensibilidades com o PMO de 05/2016.

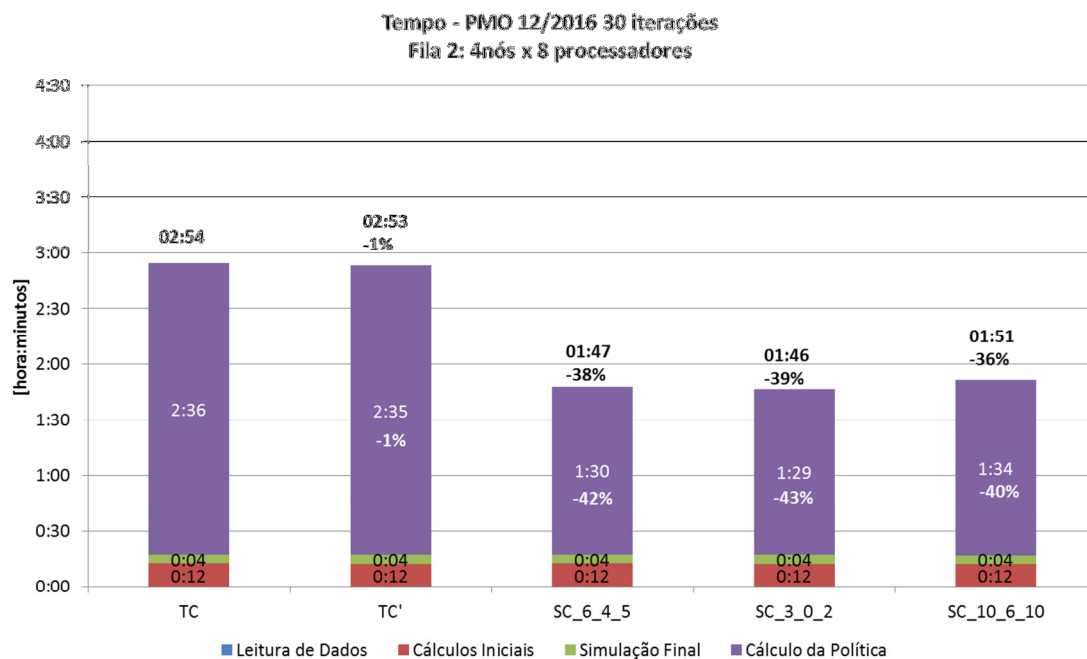


Figura 31 Tempo computacional das sensibilidades com o PMO de 12/2016.

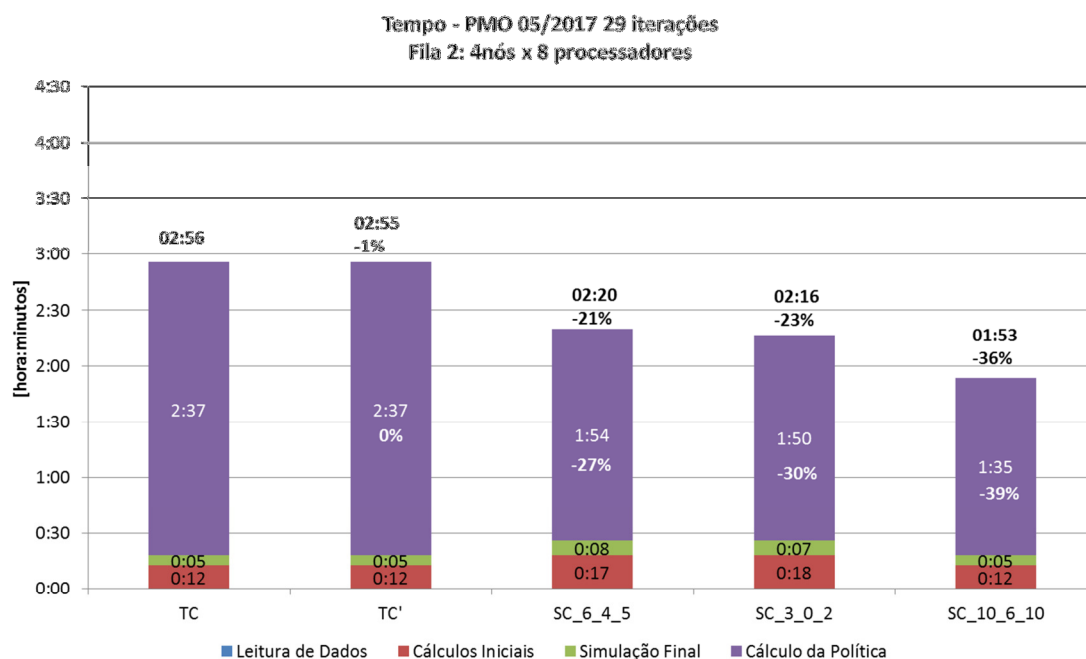


Figura 32 Tempo computacional das sensibilidades com o PMO de 05/2017.

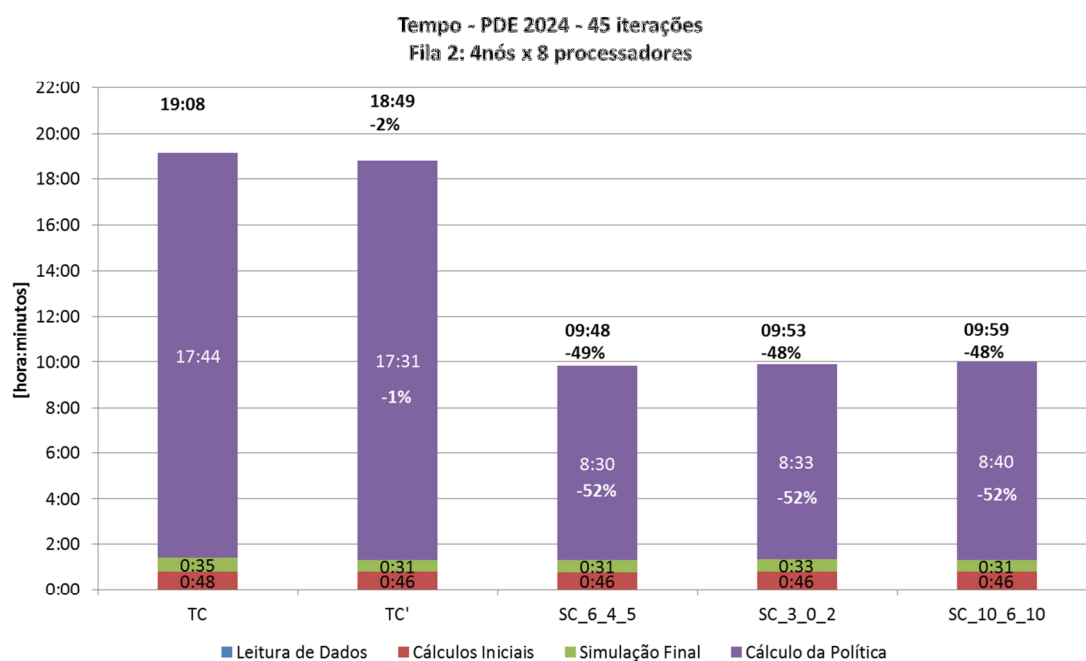


Figura 33 Tempo computacional das sensibilidades com o PDE 2024.

Os casos foram rodados com 2 processadores Intel(R) Xeon(R) CPU X5650 @ 2.67GHz (6 núcleos físicos e 12 núcleos virtuais cada), com 24GB de memória e 120 Gb de disco rígido de tecnologia de estado sólido (SSD).

Nos casos estudados de PMO verificam-se reduções no tempo para cálculo da política entre 23% e 43%, já no PDE 2024 a houve redução de 52%.

4.8. Topologia com 12 REEs

Com o objetivo de verificar os possíveis ganhos na representação do sistema com a aplicação da seleção de cortes serão comparados os tempos de execução do NEWAVE considerando a topologia com 9 REEs (vigente) e com 12 REEs, usando os decks de PMO/PLD e de Revisão Ordinária da Garantia Física, respectivamente Figura 34 e Figura 35. Visando comparar os casos com o mesmo número de iterações considerou-se a maior interação de convergência entre os casos.

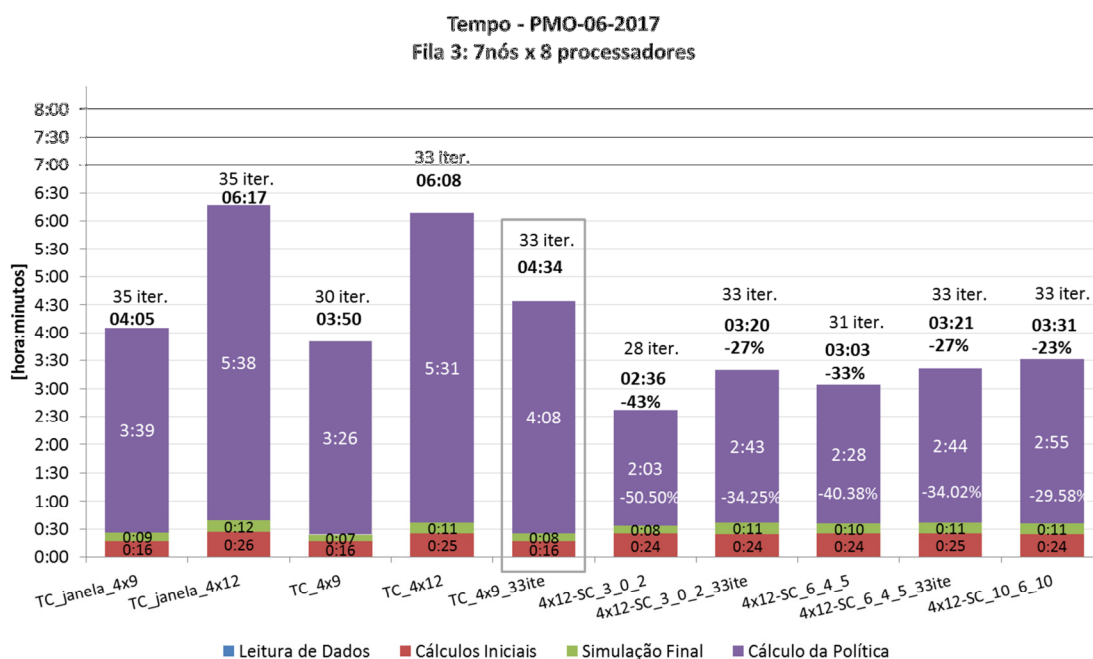


Figura 34 Comparação do tempo de execução considerando o PMO de 06/2017 com 9 e com 12 REEs.

Verifica-se no caso apresentado que há redução significativa do tempo gasto no cálculo da política ao utilizar a seleção de cortes, dessa forma o tempo do caso com 12 REEs com seleção de cortes para este caso foi ainda menor que o do caso com 9 REEs com todos os cortes considerados. Ressalta-se que a versão oficial do NEWAVE descarta os cortes não utilizados nas últimas 2*NREE iterações e por isso gera soluções aproximadas, esses casos foram denominados no gráfico como TC_janela. Os casos TC e SC_X K2_nadic foram executados na versão 23.1.2 do NEWAVE que permite usar todos os cortes em todas as iterações, ou seja, é a solução exata, assim a comparação de tempo de execução entre os casos com 9 e 12 REEs está adequada, devendo-se usar como referência o caso TC destacado na figura. Os casos com todos os cortes e os que utilizam diferentes parâmetros na seleção de cortes podem convergir

em iterações distintas, por isso o gráfico apresenta a iteração de convergência de cada caso e também o mesmo caso fixando a iteração de parada como a maior verificada entre eles.

Os casos foram rodados com 7 processadores Intel(R) Xeon(R) CPU E5504 @ 2.00GHz (4 núcleos físicos e 8 núcleos virtuais cada), com 32GB de memória e 540 Gb de disco rígido magnético (HDD).

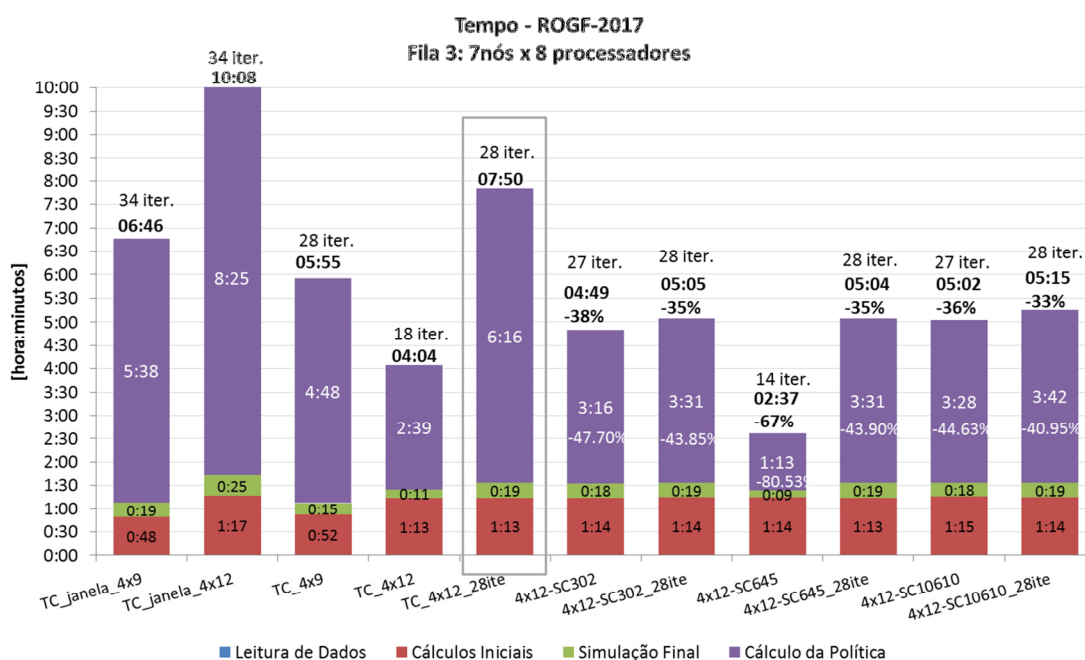


Figura 35 Comparação do tempo de execução considerando o caso de Garantia Física com 9 e com 12 REEs.

4.9. Análise das características operativas

4.9.1. Resultados modelo NEWAVE - PLD Maio/2017 topologia 12 REEs

Esta seção apresenta os estudos associados às simulações dos decks do PLD de Maio/2017. São apresentados os resultados das simulações considerando a topologia com 12 REEs com as seguintes sensibilidade.

- 12 REEs: NEWAVE versão 23 (oficial)
- 12 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com todos os cortes (TC)
- 12 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com seleção de cortes (SC)

A Figura 36 apresenta a geração hidráulica do SIN associada ao deck do PLD de Maio/2017. Comparando os resultados das três sensibilidade, observa-se que as curvas da evolução temporal da geração hidráulica, ao longo do horizonte de planejamento, são similares como era esperado. O mesmo comportamento é observado nas curvas de evolução temporal da geração térmica, apresentadas na Figura 37.

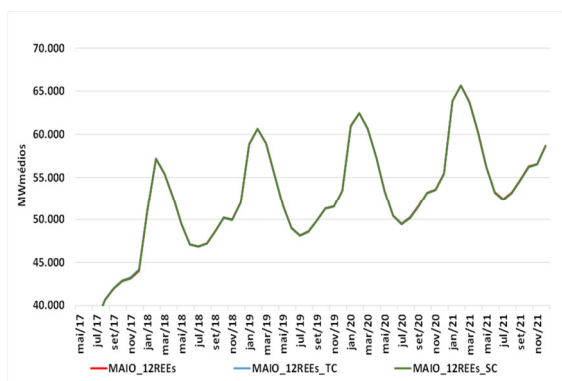


Figura 36 – Geração hidráulica do SIN

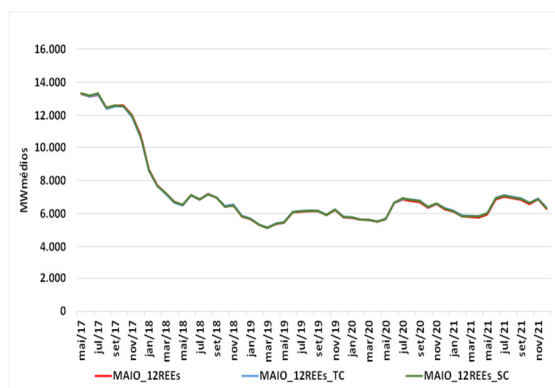


Figura 37 – Geração térmica do SIN

As Figura 38 e Figura 39 apresentam os resultados das curvas de evolução temporal dos custos marginais de operação (CMO) do deck do PLD de maio/2017, ao longo do horizonte de planejamento para os submercados sudeste e nordeste, respectivamente.

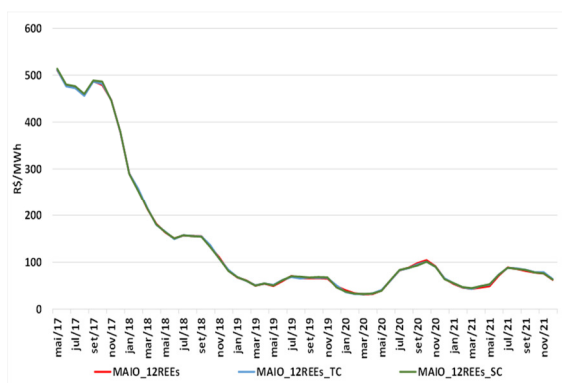


Figura 38 – Evolução temporal do CMO do sudeste – PLD maio/2017

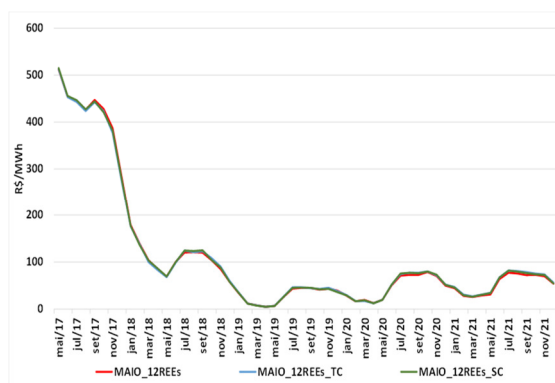


Figura 39 – Evolução temporal do CMO do nordeste – PLD maio/2017

As Figura 40 e Figura 41 apresentam os valores de Zinf (valor estimado do custo total de operação) e Zsup (valor esperado do custo total de operação) respectivamente, para cada interação do modelo NEWAVE. Comparando os resultados das três sensibilidade se observa que tanto o valor estimado quanto o valor esperado do custo total da operação são similares nas execuções apresentadas.

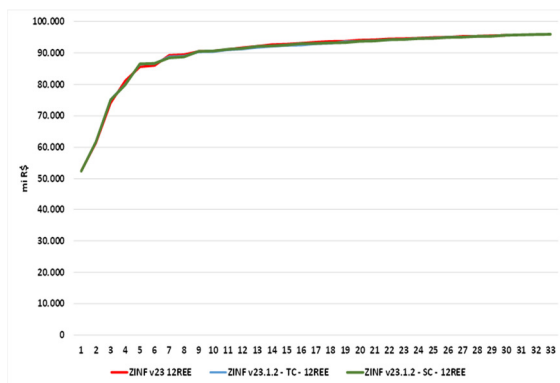


Figura 40 – Zinf do modelo NEWAVE - PLD Maio/2017

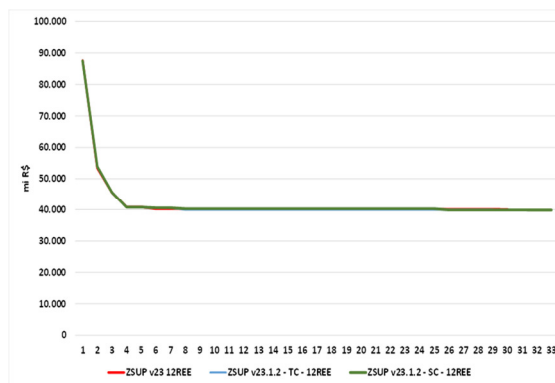


Figura 41 – Zsup do modelo NEWAVE - PLD Maio/2017

4.9.2. Resultados modelo DECOMP - PLD Maio/2017 topologia 12 REEs

Visando complementar a análise da topologia que considera 12 REEs e a metodologia de seleção de cortes também foram realizados estudos de sensibilidade no modelo DECOMP para a revisão 0 (RV0) associada a simulação do deck do PLD de maio/2017, cujos resultados são apresentados nas Figura 42 e Figura 43.

Observa-se uma elevação de 1% no custo do MWh da energia, no submercado Sudeste, quando comparam-se os resultados originários das simulações da versão oficial (v23) e da versão 23.1.2 com a seleção de cortes (SC). Para o submercado Nordeste essa elevação é de 0,5%.

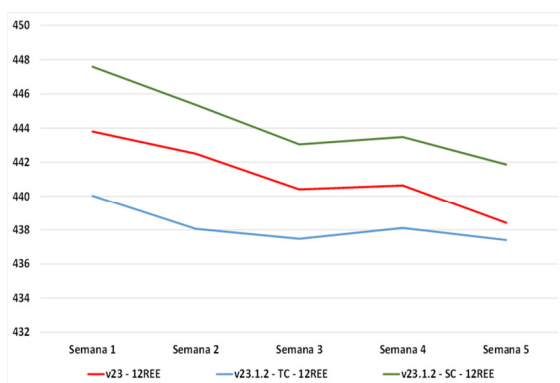


Figura 42 – Resultado do PLD Maio/2017 RV0 – submercado Sudeste

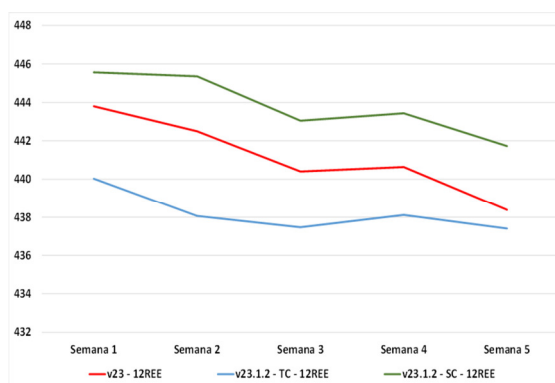


Figura 43 – Resultado do PLD Maio/2017 RV0 – submercado Nordeste

A Figura 44 apresenta os valores de Zinf e Zsup, respectivamente, para cada iteração do modelo DECOMP. Comparando os resultados das três sensibilidade observa-se que esses valores são similares.

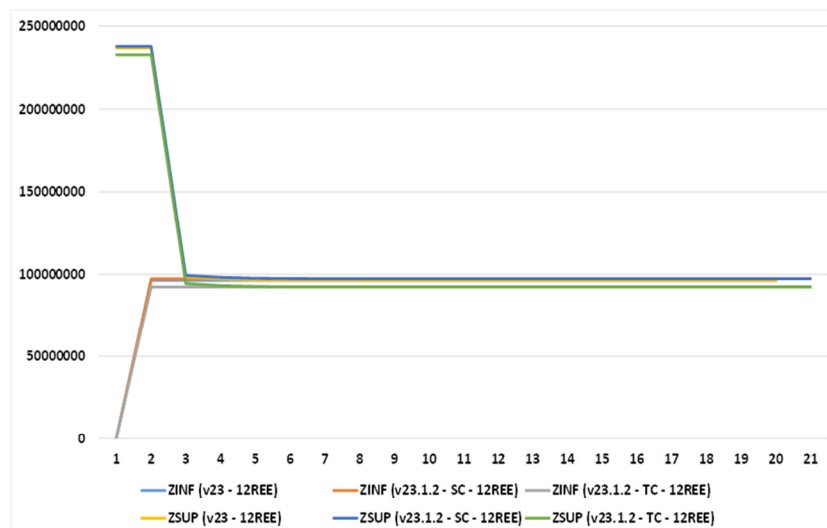


Figura 44 – Zinf e Zsup do modelo DECOMP - PLD Maio/2017

4.9.3. Resultados modelo NEWAVE - PLD Maio/2017 topologia 9 REEs

Esta seção apresenta os resultados das simulações associadas ao deck do PLD de Maio/2017, considerando a topologia com 9 REEs. As sensibilidades analisadas são:

- 9 REEs: NEWAVE versão oficial
- 9 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com todos os cortes (TC)
- 9 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com seleção de cortes (SC)

A Figura 45 apresenta a geração hidráulica do SIN associada ao deck do PLD de Maio/2017, considerando a topologia de 9 REEs. Comparando os resultados das três sensibilidades, observa-se que as curvas da evolução temporal da geração hidráulica ao longo do horizonte de planejamento são similares. O mesmo comportamento é observado nas curvas de evolução temporal da geração térmica, apresentadas na Figura 46.

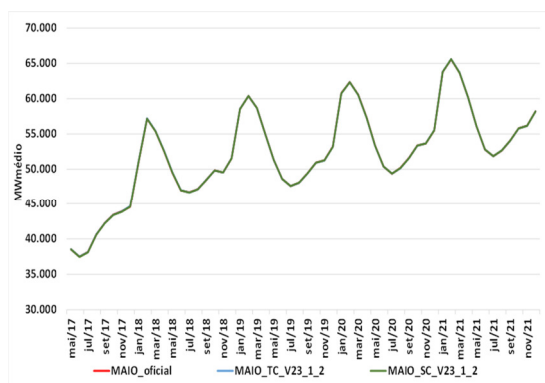


Figura 45 – Geração hidráulica do SIN

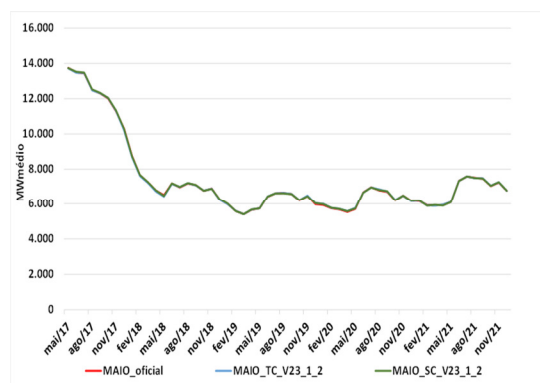


Figura 46 – Geração térmica do SIN

As Figura 47 e Figura 48 apresentam os resultados das curvas de evolução temporal do CMO associadas ao deck do PLD de Maio/2017 para os submercados Sudeste e Nordeste, respectivamente. Comparando os resultados das três sensibilidades, observa-se que os resultados são bem aderentes, o uso da seleção de cortes não alterou os resultados relacionados ao CMO.

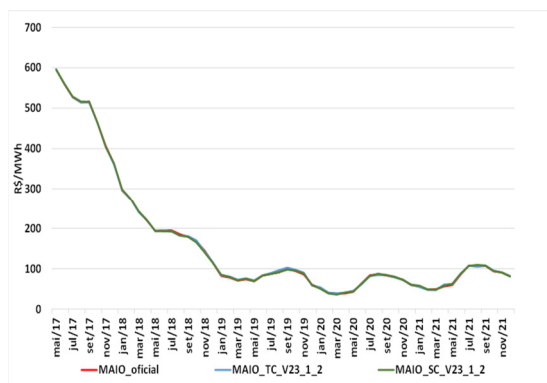


Figura 47 – Evolução temporal do CMO do Sudeste – PLD maio/2017

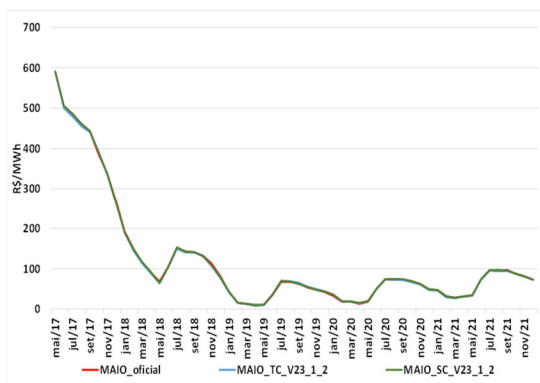


Figura 48 – Evolução temporal do CMO do Nordeste – PLD maio/2017

As Figura 49 e Figura 50 apresentam os valores de Zinf (valor estimado do custo total de operação) e Zsup (valor esperado do custo total de operação) respectivamente, para cada interação do modelo NEWAVE. Comparando os resultados, observa-se que tanto o valor estimado quanto o valor esperado do custo total da operação são bem similares nos três casos apresentados.

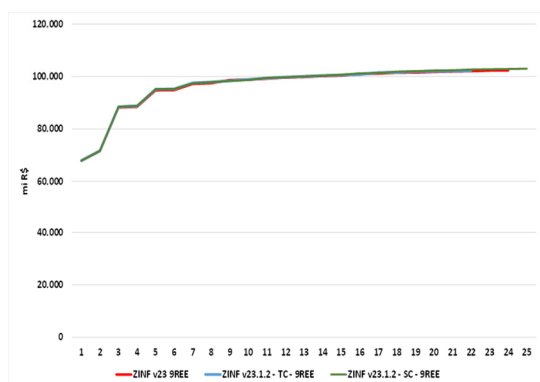


Figura 49 - Zinf do modelo NEWAVE - PLD Maio/2017

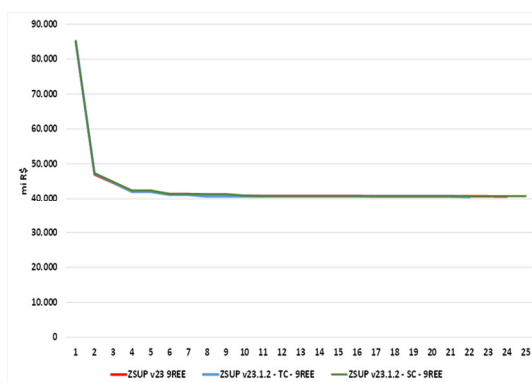


Figura 50 - Zsup do modelo NEWAVE - PLD Maio/2017

4.9.4. Resultados modelo DECOMP - PLD Maio/2017 topologia 9 REEs

Complementando a análise dos resultados apresentados na seção anterior, também foram realizados estudos de sensibilidade no modelo DECOMP para a revisão 0 (RV0) associada à simulação do deck do PLD de Maio/2017 considerando a topologia de 9 REEs. Os resultados são apresentados nas Figura 51 e Figura 52.

Para o submercado Sudeste, os resultados das simulações da versão oficial (v3) e da configuração da versão 23.1.2 que considera a seleção de cortes (SC) apresentaram resultados muito similares, sendo as maiores diferenças observadas nas semanas 3 e 4 (-0,4%). Para o submercado Nordeste, o mesmo comportamento é observado com uma redução média 0,3% no custo do PLD.

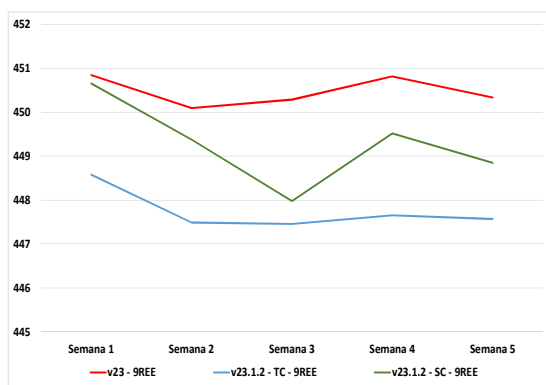


Figura 51 - Resultado do PLD Maio/2017 RV0 – submercado Sudeste

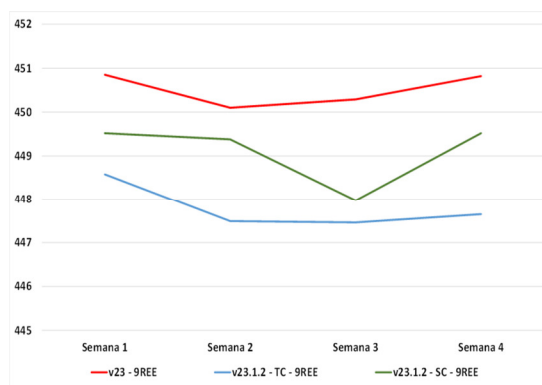


Figura 52 - Resultado do PLD Maio/2017 RV0 – submercado Nordeste

A Figura 53 apresenta os valores de Zinf e Zsup, respectivamente, para cada iteração do modelo DECOMP. Comparando os resultados das três sensibilidades observa-se que esses valores são similares.

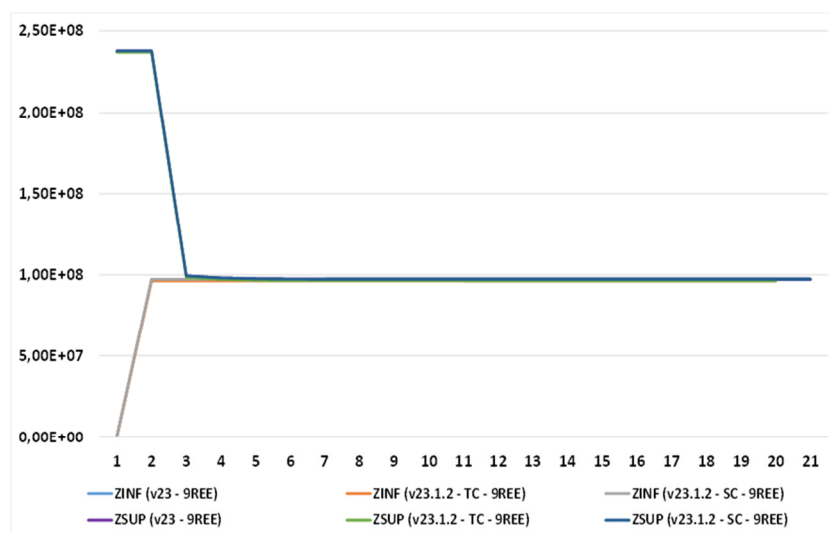


Figura 53 - Zinf e Zsup do modelo DECOMP - PLD Maio/2017

4.9.5. Resultados modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016 topologia 9 REEs

Esta seção apresenta os resultados das simulações associadas ao deck do PLD de Dezembro/2016, considerando a topologia com 9 REEs. As sensibilidades analisadas são:

- 9 REEs: NEWAVE versão oficial
- 9 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com todos os cortes (TC)
- 9 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com seleção de cortes (SC)

As Figura 54 e Figura 55 apresentam a geração hidráulica do SIN associada ao deck do PLD de Dezembro/2016, considerando a topologia de 9 REEs. Comparando os resultados das três curvas de evolução temporal da geração hidráulica ao longo do horizonte de planejamento, observa-se que os resultados são equivalentes. O mesmo comportamento é observado na curva da evolução temporal da geração térmica, apresentada na Figura 55.

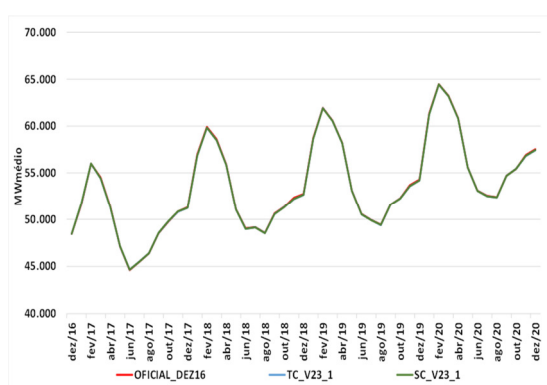


Figura 54 - Geração hidráulica do SIN

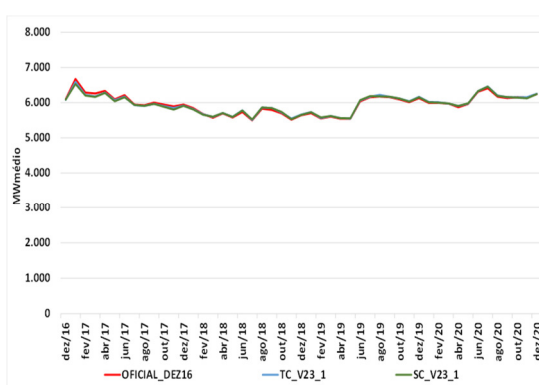


Figura 55 - Geração térmica do SIN.

As Figura 56 e Figura 57 apresentam os resultados das curvas de evolução temporal dos custos marginais de operação (CMO) do deck do PLD de Dezembro/2016, considerando a topologia de 9 REEs, ao longo do horizonte de planejamento, para os submercados Sudeste e Nordeste, respectivamente. Observam-se pequenas variações entre as curvas de evolução temporal do CMO nos submercados Sudeste e Nordeste.

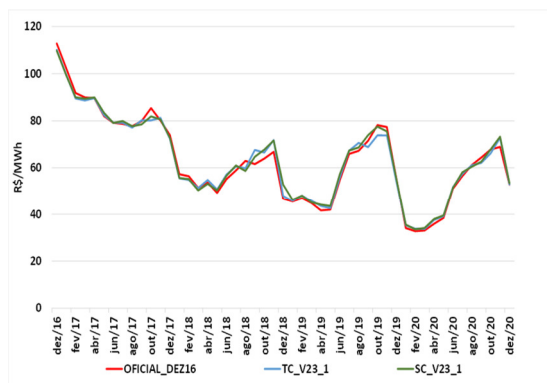


Figura 56 - Evolução temporal do CMO do Sudeste – PLD Dezembro/2016.

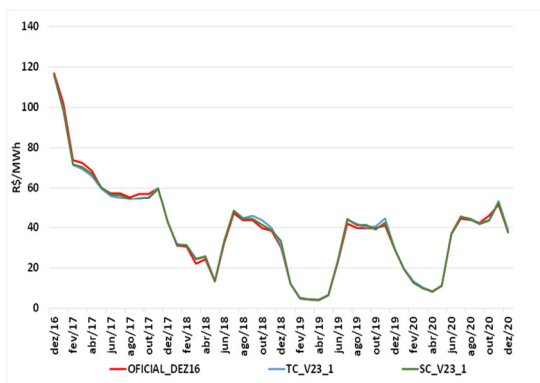


Figura 57 - Evolução temporal do CMO do Nordeste – PLD Dezembro/2016.

As Figura 58 e 59 apresentam os valores de Zinf (valor estimado do custo total de operação) e Zsup (valor esperado do custo total de operação) respectivamente, para cada interação do modelo NEWAVE. Comparando os resultados das três sensibilidades se observa que tanto o valor estimado quanto o valor esperado do custo total da operação são similares.

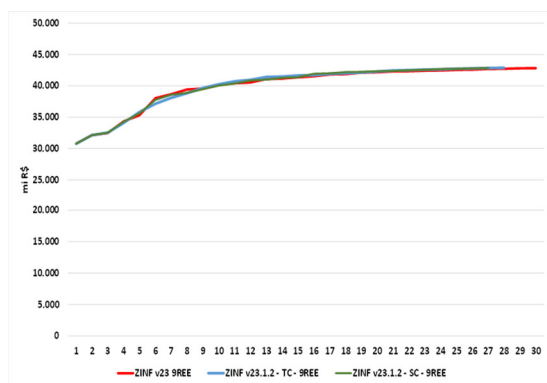


Figura 58 - Zinf do modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016

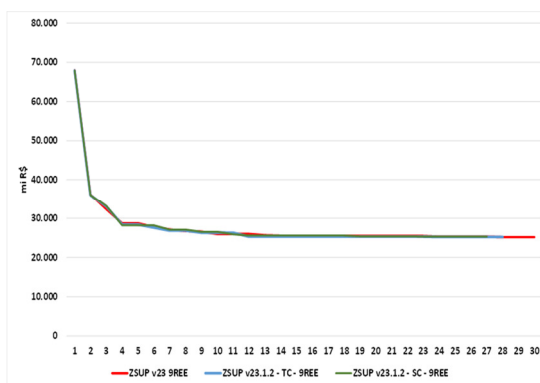


Figura 59 - Zsup do modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016

4.9.6. Resultados modelo DECOMP - PLD Dezembro/2016 topologia 9 REEs

Complementando a análise dos resultados apresentados na seção anterior também foram realizados estudos de sensibilidade no modelo DECOMP para a revisão 0 (RV0) associada a simulação do deck do PLD de Dezembro/2016, considerando a topologia com 9 REEs, cujos resultados são apresentados nas Figura 60 e Figura 61.

Comparando os resultados das rodadas do DECOMP que consideraram os arquivos de saída do modelo NEWAVE versão oficial (v23) e da versão 23.1.2 que considera a seleção de cortes (SC) os resultados são similares. O mesmo comportamento é observado no submercado Nordeste.

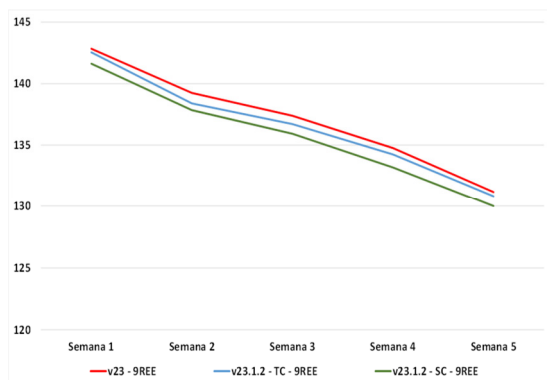


Figura 60 - Resultado do PLD Dezembro/2016 RV0 – submercado Sudeste

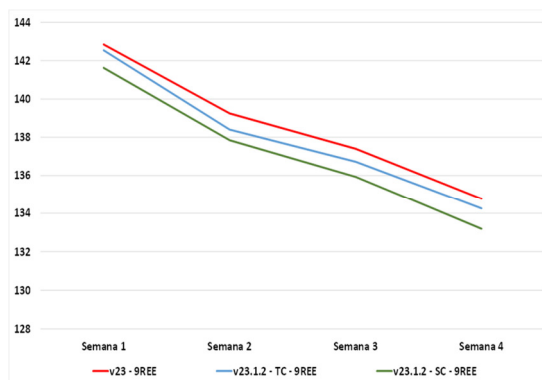


Figura 61 - Resultado do PLD Dezembro/2016 RV0 – submercado Nordeste

A Figura 62 apresenta os valores de Zinf e Zsup, respectivamente, para cada interação do modelo DECOMP. Comparando os resultados das três sensibilidades observa-se que esses valores são similares.

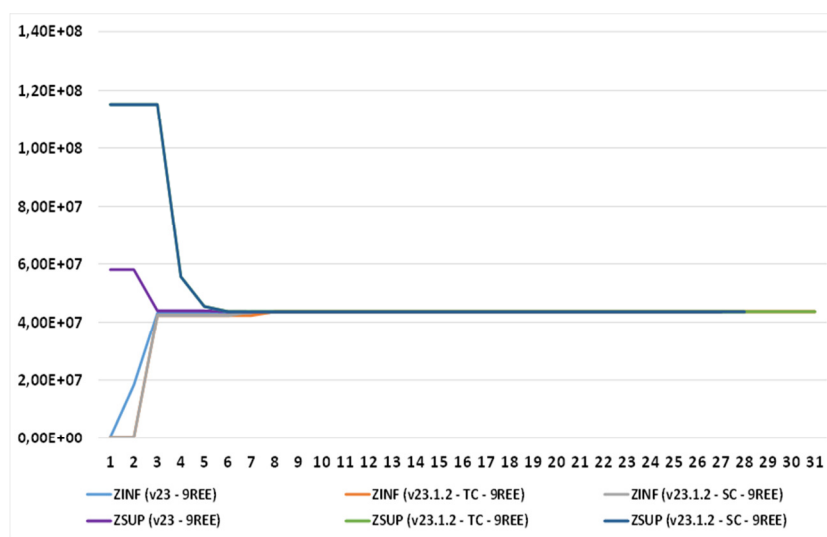


Figura 62 - Zinf e Zsup do modelo DECOMP - PLD Dezembro/2016

4.9.7. Resultados modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016 topologia 12 REEs

Esta seção apresenta os resultados das simulações associadas ao deck do PLD de Dezembro/2016, considerando a topologia com 12 REEs. As sensibilidades analisadas são:

- 12 REEs: NEWAVE versão oficial
- 12 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com todos os cortes (TC)
- 12 REEs: NEWAVE versão 23.1.2 com seleção de cortes (SC)

As Figura 63 e Figura 64 apresentam a geração hidráulica do SIN associada ao deck do PLD de Dezembro/2016, considerando a topologia de 12 REEs. Comparando os resultados das três curvas de evolução temporal da geração hidráulica ao longo do horizonte de planejamento, observa-se que os resultados são equivalentes. O mesmo comportamento é observado nas curvas da evolução temporal da geração térmica, apresentada na Figura 64.

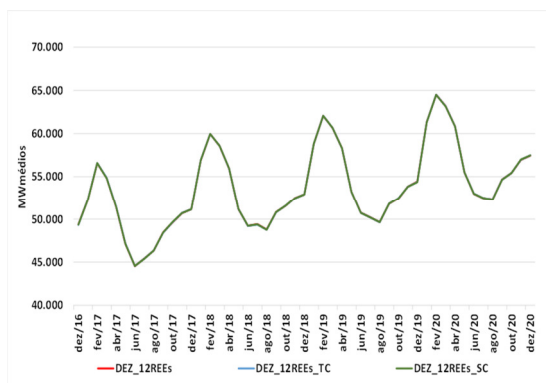


Figura 63 – Geração hidráulica do SIN

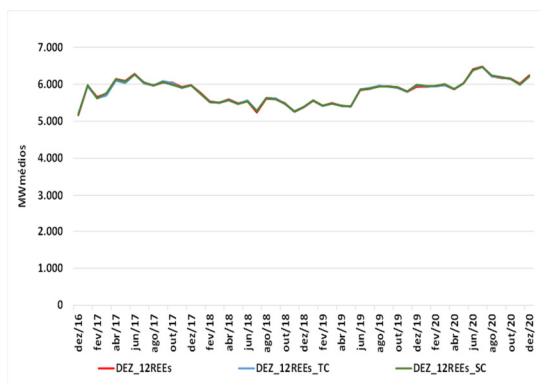


Figura 64 – Geração térmica do SIN

As Figura 65 e Figura 66 apresentam os resultados das curvas de evolução temporal dos custos marginais de operação (CMO) do deck do PLD de Dezembro/2016, ao longo do horizonte de planejamento para os submercados Sudeste e Nordeste, respectivamente. Comparando as curvas de evolução temporal das três sensibilidades observa-se que os resultados são similares.

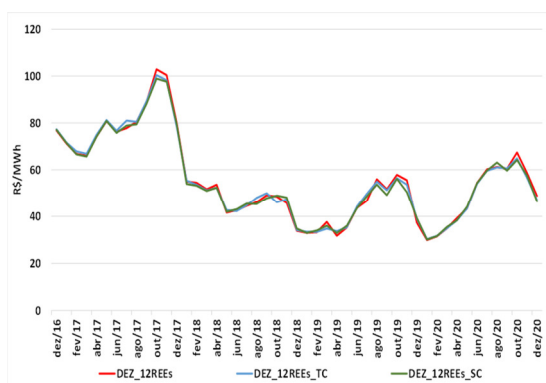


Figura 65 – Evolução temporal do CMO do Sudeste – PLD Dezembro/2016

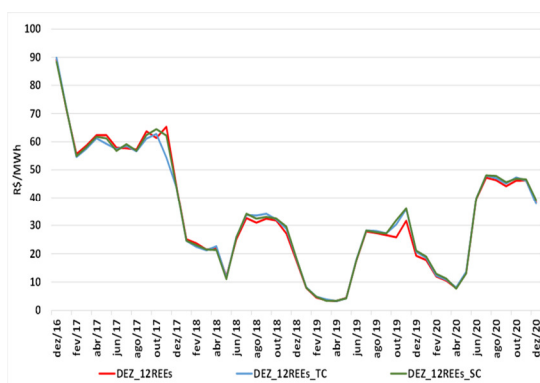


Figura 66 – Evolução temporal do CMO do Nordeste – PLD Dezembro/2016

As Figura 67 e Figura 68 apresentam os valores de Zinf (valor estimado do custo total de operação) e Zsup (valor esperado do custo total de operação) respectivamente, para cada interação do modelo NEWAVE. Comparando os resultados das três sensibilidades se observa que tanto o valor estimado quanto o valor esperado do custo total da operação são similares.

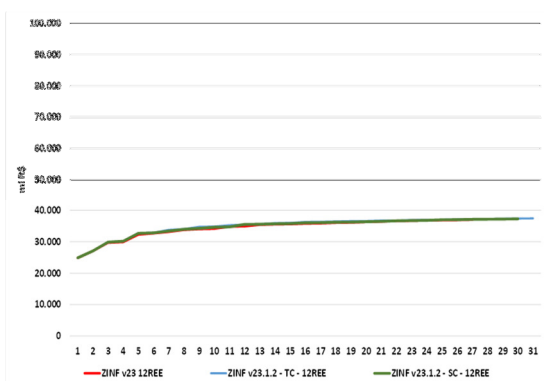


Figura 67 - Zinf do modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016

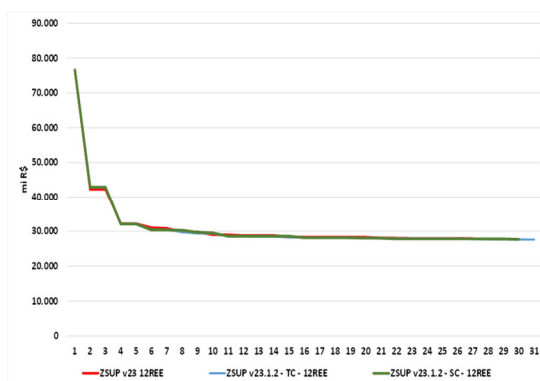


Figura 68 - Zsup do modelo NEWAVE - PLD Dezembro/2016

4.9.8. Resultados modelo DECOMP - PLD Dezembro/2016 topologia 12 REEs

Visando complementar a análise dos resultados apresentados na seção anterior também foram realizados estudos de sensibilidade no modelo DECOMP para a revisão 0 (RV0) associada a simulação do deck do PLD de Dezembro/2016, cujos resultados são apresentados nas Figura 69 e Figura 70.

Comparando os resultados das rodadas do DECOMP que consideraram os arquivos de saída do modelo NEWAVE versão oficial (v23) e a da versão 23.1.2 que considera a seleção de cortes (SC), os resultados do são equivalentes. Para o submercado Nordeste o mesmo comportamento é observado.

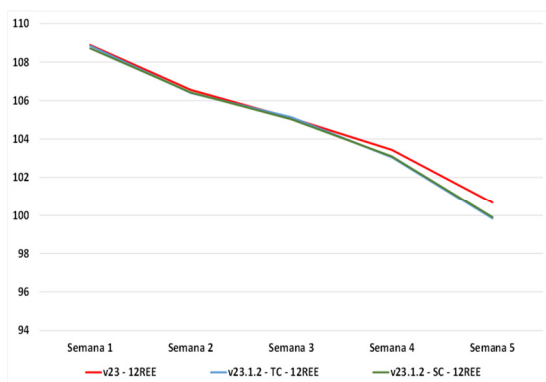


Figura 69 – Resultado do PLD Dezembro/2016 RV0 – submercado Sudeste

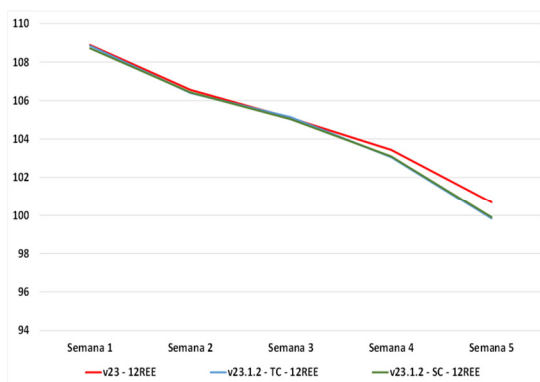


Figura 70 – Resultado do PLD Dezembro/2016 RV0 – submercado Nordeste

A Figura 71 apresenta os valores de Zinf e Zsup, respectivamente, para cada iteração do modelo DECOMP. Comparando os resultados das três sensibilidades observa-se que esses valores são similares.

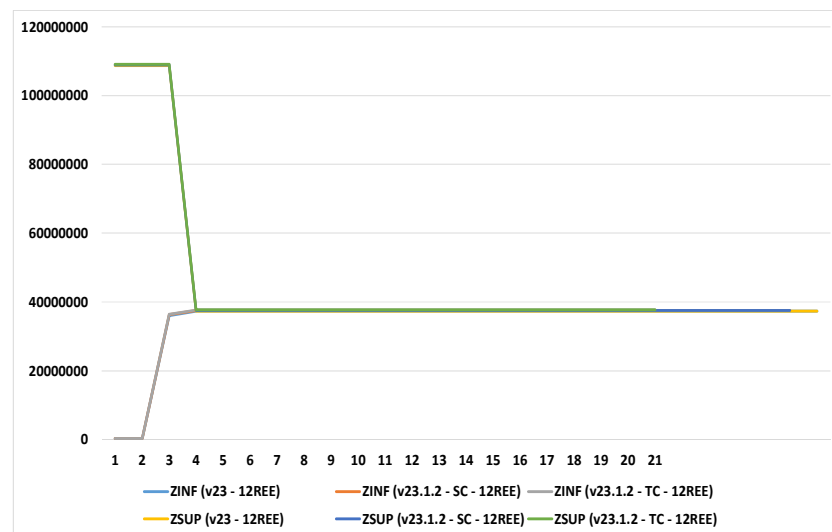


Figura 71 - Zinf e Zsup do modelo DECOMP - PLD Dezembro/2016

4.9.9. Tempo de processamento

A Figura 72 apresenta um comparativo do tempo de processamento do modelo NEWAVE associado à simulação do deck do PLD de Maio/2017. Observa-se que o tempo de processamento por iteração na versão NEWAVE 23.1.2 considerando a topologia com 12 REEs e com seleção de cortes é inferior ao tempo de processamento da versão vigente. Esse é um dos principais ganhos da versão 23.1.2 que considera a seleção de cortes, viabilizando o uso da topologia com os 12 REEs.

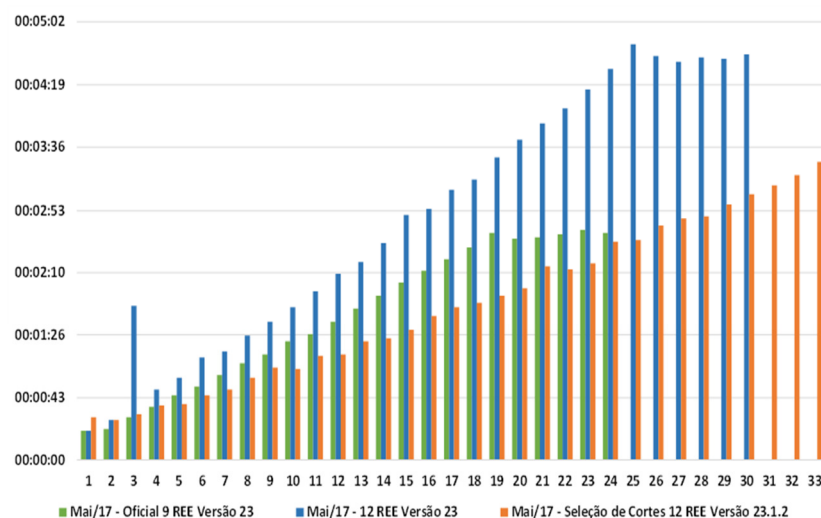


Figura 72 – Tempo por iteração - PLD Maio/2017

Complementando as informações da Figura 72, a Tabela 1 apresenta o número de iterações, o tempo médio de processamento por iteração e o tempo total de processamento dos casos apresentados. Simulando a topologia com 12 REEs na versão vigente o tempo total de processamento aumentou em 101,02%. Considerando a versão 23.1.2 do modelo NEWAVE com seleção de cortes, o aumento no tempo de processamento do caso com 12 REEs foi de 49,7% e o número de iteração teve um acréscimo de 37,5%.

Caso	Descrição	Número de Iterações	Tempo Médio por Iteração	Tempo Total
A	PLD Maio/17 versão 23 - 9 REE	24	00:01:58	00:47:13
-	Diferença: A <i>versus</i> B	25,0%	60,9%	101,2%
B	PLD Maio/17 versão 23 - 12 REE	30	00:03:10	01:34:59
-	Diferença: B <i>versus</i> C	10,0%	-32,3%	-25,6%
C	PLD Maio/17 versão 23.1.2 - 12 REE com Seleção de Cortes	33	00:02:09	01:10:42
-	Diferença: A <i>versus</i> C	37,5%	8,9%	49,7%

Tabela 1 - Tempo de processamento associados ao deck do PLD Maio/2017

A Figura 73 apresenta um comparativo do tempo de processamento do modelo NEWAVE associado à simulação do deck do PLD de Dezembro/2016. Observa-se que o tempo de processamento por iteração na versão NEWAVE 23.1.2 considerando a configuração de 12 REEs com seleção de cortes é inferior ao tempo de processamento da versão 23. Esse é um dos principais ganhos da metodologia de seleção de cortes que viabiliza o uso da topologia que considera os 12 REEs.

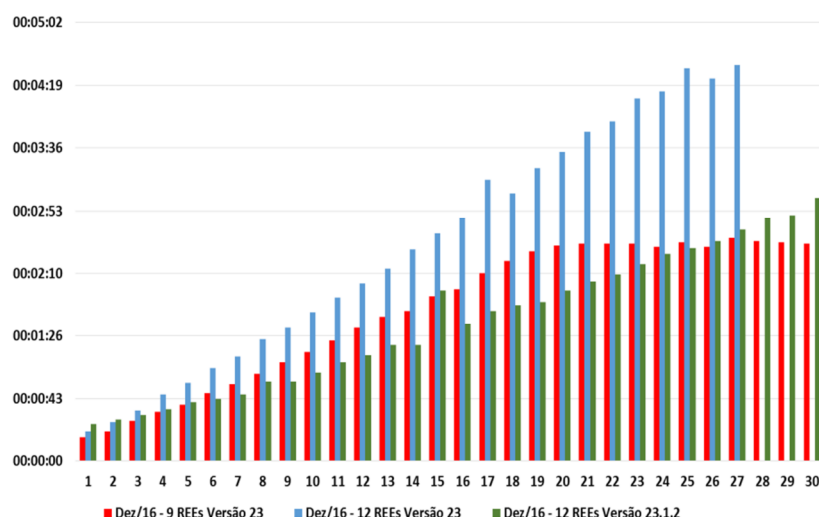


Figura 73 - Tempo por iteração - PLD Dezembro/2016

Complementando as informações da Figura 73, Tabela 2 apresenta o número de iterações, o tempo médio de processamento por iteração e o tempo total de processamento dos casos apresentados. Simulando a topologia com 12 REEs, no modelo NEWAVE, associado à simulação do deck do PLD de Dezembro/2016 na versão vigente o tempo total de processamento aumentou em 29,9% se comparado a topologia com 9 REEs. Considerando a versão 23.1.2 do modelo NEWAVE com seleção de cortes o tempo de processamento do caso com 12 REEs teve um acréscimo de 1,4%. O número de iterações, neste caso, não se alterou.

Caso	Descrição	Número de Iterações	Tempo Médio por Iteração	Tempo Total
A	PLD Dezembro/16 versão 23 - 9 REE	30	00:01:58	00:59:12
-	Diferença: A versus B	-10,0%	44,3%	29,9%
B	PLD Dezembro/16 versão 23 - 12 REE	27	00:02:51	01:16:53
-	Diferença: B versus C	11,1%	-29,7%	-21,9%
C	PLD Dezembro/16 versão 23.1.2 - 12 REE com Seleção de Cortes	30	00:02:00	01:00:02
-	Diferença: A versus C	0,0%	1,4%	1,4%

Tabela 2 -Tempo de processamento associados ao deck do PLD Dezembro/2016

A Figura 74 apresenta um comparativo do tempo de processamento do modelo NEWAVE por iteração associado à simulação do deck do PLD de Maio/2017 considerando a topologia de 9 REEs . Observa-se que o tempo de processamento por iteração na versão NEWAVE 23.1.2, que considera a seleção de cortes é inferior ao tempo de processamento da versão 23.

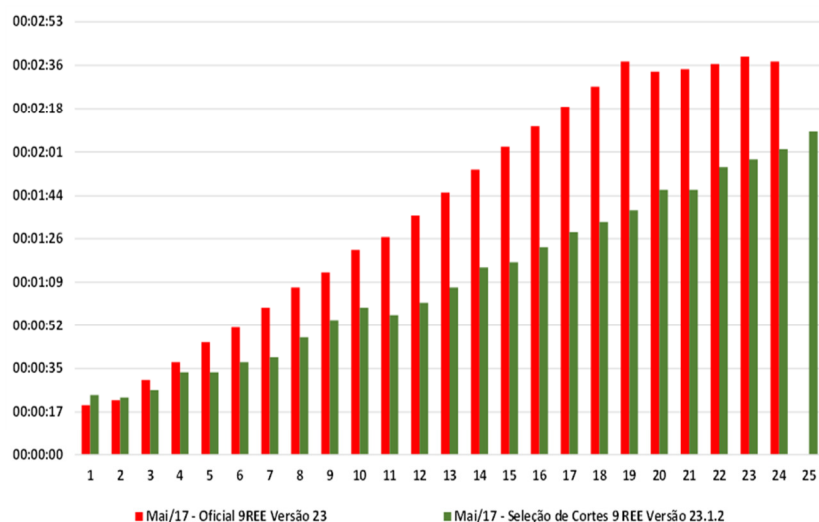


Figura 74 – Tempo de processamento por iteração

A Tabela 3 apresenta o número de iterações, o tempo médio de processamento por iteração e o tempo total de processamento considerando a topologia com 9 REEs, comparando os resultados das versões NEWAVE oficial e da versão 23.1.2. O tempo total de processamento da versão 23.1.2 foi reduzido em 32,2%, tornando o processo de cálculo da política operativa do modelo NEWAVE mais eficiente.

Caso	Descrição	Número de Iterações	Tempo Médio por Iteração	Tempo Total
A	PLD Dezembro/16 versão 23 - 9 REE	30	00:01:58	00:59:12
B	PLD Dezembro/16 versão 23.1.2 - 9 REE com Seleção de Cortes	27	00:01:29	00:40:08
-	Diferença: A versus B	-10,0%	-24,7%	-32,2%

Tabela 3 - Tempo de processamento Newave

5. Conclusão

A metodologia proposta de seleção de cortes se mostrou adequada e tecnicamente robusta, com soluções equivalentes às atualmente obtidas, porém com reais ganhos de efficientização em tempo de processamento, permitindo até que se utilize um número maior de REEs, conforme previsto no Relatório Técnico Avaliação da Representação do SIN em Reservatórios Equivalentes de Energia – REE (2015).

Ressalta-se que soluções equivalentes se referem a soluções de custos semelhantes, ainda que podendo resultar em decisões operativas distintas, em relação ao processo geral de programação dinâmica dual estocástica (PDDE). As sensibilidades apresentadas corroboram essa afirmação.

6. Recomendações

A metodologia está apta para ser considerada na primeira semana operativa de janeiro de 2018 para os processos da operação e formação de preço. Recomenda-se que nesta ocasião também seja adotada a topologia G (12 REEs), conforme previsto pelo Relatório Técnico Avaliação da Representação do SIN em Reservatórios Equivalentes de Energia – REE (2015) [7].

Este relatório deverá subsidiar uma consulta pública sobre o tema.

A versão 23.1.3 do modelo NEWAVE, utilizada para as sensibilidades aqui apresentadas, deverá seguir para validação na FT- NEWAVE, inclusive para definição da parametrização adequada para as distintas aplicações (PMO, PLD, cálculo de garantia física, PDE e PEN), posto que esta parametrização será pautada na redução de tempo computacional. Cabe ressaltar que esta recomendação é pautada na conclusão de que as soluções são equivalentes, independente da parametrização.

7. Referências

- [1] CEPEL, Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, “Estratégia de seleção de cortes de Benders para redução do tempo computacional da Programação Dinâmica Dual Estocástica - Aplicação ao Modelo NEWAVE”, Relatório Técnico, Junho/2017
- [2] A.L. Diniz, “Processo iterativo de construção da função de produção das usinas hidroelétricas para o problema de coordenação hidrotérmica”, XX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009.
- [3] T. N. Santos, A. L. Diniz, “A Dynamic Piecewise Linear Model for DC Transmission Losses in Optimal Scheduling Problems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.26, n.2, pp. 508-519, May 2011..
- [4] R.B.S. Brandi, T.P. Ramos, B.H. Dias, A.L.M. Marcato, I.C. Silva Junior, “Improving stochastic dynamic programming on hydrothermal systems through an iterative process”, *Electric Power Systems Research*, v.123. pp. 147-153, Jun. 2015.
- [5] V.L. de Matos, A.B. Philpott, E.C. Finardi, “Improving the Performance of Stochastic Dual Dynamic Programming”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v.290, pp. 196-208., Dec. 2015.
- [6] W. Tekaya, A. Shapiro, M. P. Soares, J. P. Costa, “Worst-case-expectation approach to optimization under uncertainty”, *Operations Research*, v.61, n.6, pp. 1435-1449, 2012.
- [7] Relatório Técnico Avaliação da Representação do SIN em Reservatórios Equivalentes de Energia – REE (2015).