

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL



Relatório Técnico

Nº/Ano: 11138/2017 **Nº de Páginas:** 85 **Nº de Anexos:** 2

Título:

Estratégia de seleção de cortes de Benders para redução do tempo computacional da Programação Dinâmica Dual Estocástica - Aplicação ao Modelo NEWAVE

Departamento:

Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

Área de Responsabilidade:

B200

Conta de Apropriação:

1345

Cliente:

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

Resumo:

Este relatório apresenta um método de tratamento dos cortes de Benders gerados pelo modelo NEWAVE durante a estratégia de PDDE, em relação ao uso nos subproblemas de programação linear (PLs) de cada período. Propõe-se um processo iterativo para resolução de cada PL, onde os cortes já construídos em iterações passadas da PDDE são inseridos de forma progressiva, à medida que vão sendo necessários. Com isso, obtém-se uma redução no tempo computacional para resolução dos PLs e, como consequência, do processo de convergência do NEWAVE como um todo.

Autores:

André Luiz Diniz Souto Lima - Cepel
Maria Elvira Piñeiro Maceira - Cepel
Roberto José Pinto - Cepel
César Luis Vilasbôa de Vasconcellos - Cepel
Débora Dias Jardim Penna - Cepel
Cristiane Barbosa da Cruz - Cepel

Palavras-Chave:

Programação Dinâmica Dual Estocástica, Métodos iterativos, Programação Linear, Cortes de Benders

Classificação:

Controlado

Gerente de Projeto

Nome: Maria Elvira Piñeiro Maceira

Tel.: 21 2598-6454 **Fax:** 21 2598-6482

E-mail: elvira@cepel.br

Chefe do Departamento

Nome: André Luiz Diniz Souto Lima
Antonio Ricardo C. D. Carvalho
Assistente

Tel.: 21 2598-6046 **Fax:** 21 2598-6482

E-mail: diniz@cepel.br

Aprovação

Raul Balbi Sollero **Marcio Szechtman**
Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Diretor Geral

29 / 06 / 2017

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL www.cepel.br
Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000 - Fax: 21 2260-1340
Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200 - Fax: 21 2667-3518
Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21944-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: cepel@cepel.br

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

PROJETO NEWAVE

Relatório Técnico

**ESTRATÉGIA DE SELEÇÃO DE CORTES DE BENDERS PARA
REDUÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL DA PROGRAMAÇÃO
DINÂMICA DUAL ESTOCÁSTICA
– APLICAÇÃO AO MODELO NEWAVE -**

Junho/2017

ÍNDICE

1	Introdução	4
1.1	Contexto e Motivação	5
1.2	Objetivo da proposta de seleção de cortes de Benders	6
2	Histórico do Tratamento de Cortes de Benders no Modelo NEWAVE	8
2.1	Eliminação de cortes de Benders redundantes	8
2.2	Eliminação de cortes de Benders dominados	8
2.3	Janela móvel para consideração de cortes	11
3	Proposta de Seleção de Cortes de Benders	12
3.1	Conjunto inicial de cortes de Benders a serem incluídos no PL	12
3.2	Conjunto de cortes de Benders a serem testados para inclusão no PL	12
3.3	Processo iterativo de seleção de novos cortes de Benders, para inclusão no PL	13
3.4	Recuperação de base	21
3.5	Comentários	21
3.5.1	Qualidade da política operativa com a <i>Estratégia SC</i>	21
3.5.2	Calibração dos parâmetros	21
4	Resultados numéricos	23
4.1	Descrição do caso	23
4.2	Parâmetros considerados	23
4.3	Análise de desempenho: estratégia SC X estratégia TC	24
4.3.1	Redução no tempo de resolução dos PLs	24
4.3.2	Redução no tempo total de execução do NEWAVE	28
4.3.3	Comentários	34
4.4	Análise de consistência: estratégia SC X estratégia TC	35
4.4.1	Valor ótimo na resolução dos PLs	35
4.4.2	Processo de convergência do NEWAVE	36
4.5	Análise de resultados: estratégias SC x estratégia TC	41
5	Conclusões	47
6	Agradecimentos	48
7	Referências	49
8	ANEXO I	51
9	ANEXO II	54

1 INTRODUÇÃO

O modelo NEWAVE [1]-[3], desenvolvido pelo CEPEL, é um programa computacional utilizado para o planejamento da operação de longo/médio prazo e para o planejamento da expansão do setor elétrico. Este modelo é utilizado de forma oficial, sob supervisão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para coordenação da operação do sistema interligado nacional (SIN) e pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) para formação do preço *spot* da energia, também denominado preço de liquidação de diferenças (PLD). É utilizado também pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o planejamento da expansão do setor elétrico e para o cálculo da garantia física de energia, assim como para a obtenção de parâmetros utilizados no leilão de novas usinas. Adicionalmente, também é utilizado por empresas de energia elétrica e agentes em suas estratégias corporativas.

O objetivo do modelo NEWAVE é construir uma política operativa, com a qual é possível obter, entre outros resultados, metas mensais de geração hidroelétrica e termoeétrica para cada subsistema. Além disso, a função de custo futuro ao final do segundo mês é utilizada pelo modelo DECOMP, que determina, de forma mais detalhada, a geração de cada usina do sistema e os custos marginais de operação que formarão os preços de liquidação de diferença semanais, por patamar de carga.

A representação da afluência no modelo NEWAVE é estocástica, por meio de uma árvore de cenários, onde cada caminho na árvore é chamado de cenário hidrológico, e cada nó representa uma possível realização da afluência. Essas realizações seguem um processo estocástico multivariado, espacial e temporalmente, com propriedades estatísticas semelhantes ao registro histórico, as quais são preservadas durante a construção da árvore [4]. Para obter o valor final de energia afluente a ser utilizada no problema de otimização, é utilizado um modelo autorregressivo periódico de ordem p , ou seja, o valor obtido para a variável aleatória em um determinado período é função das afluências dos p períodos anteriores [5].

Como é impossível percorrer a árvore de cenários por completo, utiliza-se a estratégia de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) [6], [7] para resolver o problema, percorrendo-se um conjunto de séries de afluências em cada iteração, por meio de dois passos: (i) uma simulação *forward*, com os cenários hidrológicos amostrados, de forma a encontrar estados potencialmente relevantes para obtenção dos valores da água; (ii) uma recursão *backward*, onde se visitam todos os cenários de cada período, para cada realização da afluência, de forma a construir cortes para a função de custo futuro (FCF) ao final do período anterior. Devido à impossibilidade de se aplicar um critério estatístico de convergência proposto originalmente [6], em virtude da implementação do mecanismo

de aversão a risco CVaR [8]-[11], o processo para quando se verifica certa estabilidade no valor do limite inferior (ZINF), ou quando se atinge um número máximo de iterações pré-definido. A Figura 1.1 ilustra a estrutura de cenários *forward* e *backward* do modelo NEWAVE.

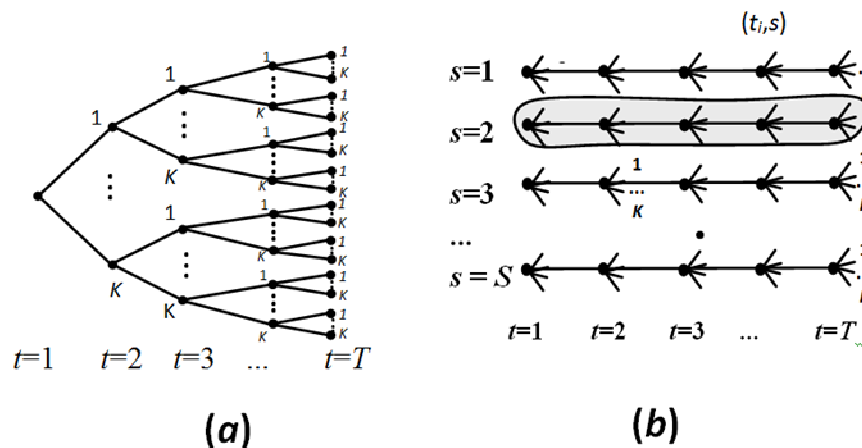


Figura 1.1 - Árvore de cenários completa de um problema multi-estágio (a) e estratégia de caminhamento na árvore pela PDDE (b), por meio de cenários *forward* e *backward*.

1.1 Contexto e Motivação

Cada iteração da PDDE requer a resolução de um problema de programação linear na simulação *forward* e *NLEQ* subproblemas na recursão *backward*, para cada período de tempo e para cada cenário hidrológico. Considerando um estudo oficial de PMO com $NPER = 120$ períodos de tempo, $NLEQ = 20$ cenários backward e $NSIM = 200$ séries na simulação forward, o número total de subproblemas de programação linear (PLs) resolvidos por iteração da PDDE é igual a $NPER \times NSIM \times NLEQ = 500.000$.

Devido à estratégia de compartilhamento de cortes de Benders da PDDE, que é possível mesmo quando há dependência temporal entre os cenários de cada período [7], [12], a cada iteração da PDDE adicionam-se $NSIM = 200$ cortes de Benders ao problema de programação linear (PL) de cada período. Após 10 iterações da PDDE, por exemplo, o número de cortes torna-se igual a 2.000 e, após 40 iterações, igual a 8.000. Entretanto, em geral um número muito pequeno de cortes ficam ativos, e os cortes construídos nas primeiras iterações tendem a ficar dominados por cortes construídos em iterações posteriores. Além disso, esse elevado número de cortes tornam a resolução de cada PL mais demorada, o que pode ser percebido pelo aumento no tempo computacional de cada iteração da PDDE, à medida que o processo avança, conforme mostrado na Tabela 1.1. Esta Tabela apresenta os valores de tempo computacional para cada iteração da PDDE, obtidos do processamento da versão oficial do modelo NEWAVE vigente em maio de 2017 (versão 23), para o PMO de JAN/2018.

Tabela 1.1 – Tempo de cada iteração da PDDE, para o PMO de JAN/2017

Iteração	Tempo	Iteração	Tempo	Iteração	Tempo
1	01min 12s	11	04min 52s	21	09min 01s
2	01min 23s	12	05min 20s	22	09min 33s
3	01min 50s	13	05min 41s	23	09min 49s
4	02min 12s	14	06min 04s	24	10min 18s
5	02min 32s	15	06min 28s		
6	02min 58s	16	06min 57s		
7	03min 18s	17	07min 17s		
8	03min 47s	18	07min 48s		
9	04min 07s	19	08min 06s		
10	04min 32s	20	08min 33s		

Como todas as iterações resolvem a mesma quantidade de subproblemas, pode-se inferir que esse aumento no tempo por iteração deve-se basicamente ao aumento excessivo no número de cortes de Benders adicionados por iteração nos PLs a serem resolvidos. Esta suposição é corroborada ao se observar que o número de restrições de cada subproblema, não considerando os cortes, é constante a cada iteração. Portanto, a proposta apresentada neste relatório visa contornar esse inconveniente, utilizando de forma mais inteligente o conjunto de cortes de Benders que compõem cada PL, o que resultará em um menor tempo de processamento, mas sem perda de acurácia nos resultados, principalmente com relação à construção da função de custo futuro.

1.2 Objetivo da proposta de seleção de cortes de Benders

Este trabalho propõe uma estratégia de seleção dos cortes (*Estratégia SC*) que devem ser considerados na resolução de um PL do problema NEWAVE, a fim de evitar a inclusão de um grande número de cortes de Benders da função de custo futuro que venham a ser desnecessários, preservando ainda a acurácia dos resultados. A proposta consiste de dois passos:

- definição de um conjunto de cortes que devem ser incluídos inicialmente no PL, com base nos resultados de iterações anteriores ou da resolução de períodos adjacentes na mesma iteração da PDDE. Estes cortes têm o objetivo de fornecer uma boa sinalização inicial para o PL, de forma a acelerar o segundo passo, descrito a seguir;
- 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 corrente para o PL, e que são potenciais candidatos a estarem ativos na solução ótima desse PL.

Evidentemente que, atendido o requisito da acurácia, o procedimento descrito anteriormente só será eficaz se reduzir o tempo total para resolução dos PLs, quando comparado à estratégia original de incluir todos os cortes de uma só vez, que será denominada nesse relatório de *Estratégia TC*.

Propostas anteriores do CEPEL mostraram grandes vantagens na realização de procedimento semelhante, em relação à inserção dinâmica de restrições para a função de produção das usinas hidroelétricas [13], [14] ou para a consideração de custos não lineares ou lineares por partes das usinas térmicas [15]. Tais estratégias foram construídas como extensão ao método iterativo para inserção de restrições da rede elétrica em problemas de fluxo de potência ótimo CC, proposto inicialmente em [16] e aplicado em [17] para as restrições de limite de fluxo e em [18] para a consideração de modelagem linear por partes para as perdas na rede. Posteriormente, essa estratégia de escolha dinâmica de restrições foi estendida por outros autores para o tratamento de cortes de Benders da função de custo futuro no contexto da programação dinâmica estocástica (PDE) [19] e PDDE [20], também apresentando bons resultados.

2 Histórico do Tratamento de Cortes de Benders no Modelo NEWAVE

Esta seção descreve alguns procedimentos que já foram realizados ao longo do tempo, em estudos e implementações envolvendo o modelo NEWAVE, para tratamento dos cortes de Benders da função de custo futuro.

2.1 Eliminação de cortes de Benders redundantes

O modelo NEWAVE considera, desde versões iniciais, um procedimento mais simples, onde apenas se eliminam cortes de Benders que tenham coeficientes iguais (dentro de certa tolerância) aos de outro corte, porém com um valor inferior para o termo independente (RHS) do corte. Neste caso, torna-se evidente que os cortes eliminados nunca estarão ativos, pois não pertencem à envoltória superior do conjunto de cortes, que consiste na função de custo futuro propriamente dita. A Figura 2.1 ilustra esse procedimento.

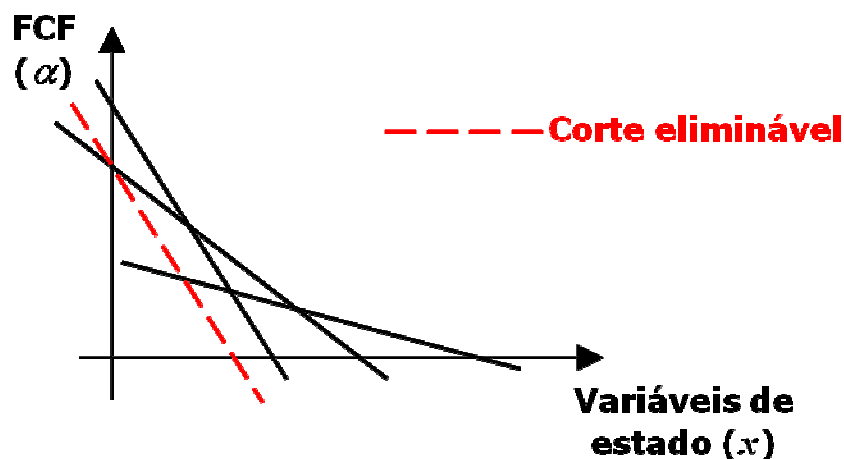


Figura 2.1 - Ilustração da estratégia de eliminação de cortes redundantes.

Apesar de esse procedimento ser bastante rápido e seguro em relação a não eliminar cortes importantes, o número total de cortes eliminado com esse procedimento é muito baixo, em torno de 1% do conjunto total de cortes que são construídos.

2.2 Eliminação de cortes de Benders dominados

Esta estratégia, que não foi objeto de estudo nesse trabalho, tem o objetivo de eliminar cortes de Benders dominados da FCF, ou seja, que sejam desnecessários por resultarem sempre em um valor para o custo futuro menor do que a de algum outro corte, para todo o domínio das variáveis de estado. A Figura 2.2 ilustra essa situação.

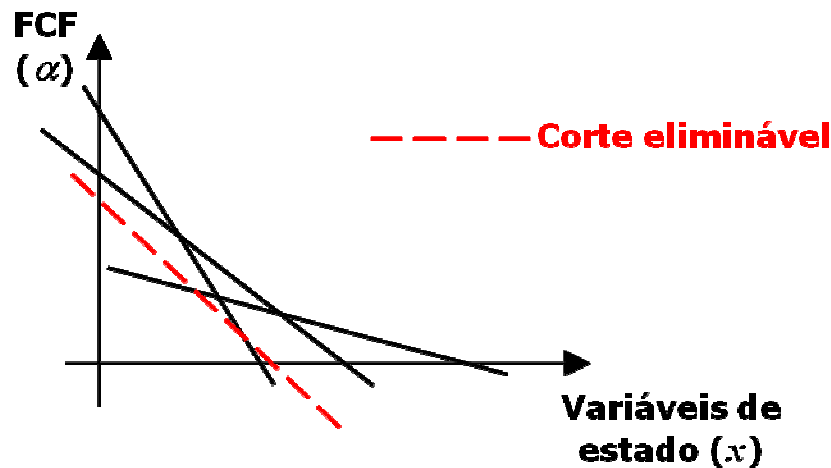


Figura 2.2 - Ilustração da estratégia de eliminação de cortes dominados

O CEPEL realizou uma avaliação inicial dessa estratégia em 2015, proposta no trabalho [21], na qual, a partir de um conjunto de $NCOR$ cortes para a FCF, resolve-se uma série de problemas de otimização, com uma função objetivo qualquer e todos os cortes da FCF, porém invertendo-se o sentido da inequação de determinado corte da função de custo futuro. Caso o problema de otimização seja inviável, o corte invertido é detectado como dominado e pode ser removido da FCF, conforme ilustrado na Figura 2.3. Se o problema de otimização tiver uma solução viável, o corte não pode ser removido, como ilustrado na Figura 2.4.

Ressalta-se que o problema de otimização indicado nessas figuras deve ser resolvido $NCOR$ vezes (um para cada um dos $NCOR$ cortes de Benders), para todos os períodos do estudo. O CEPEL analisou duas alternativas para esse procedimento, no contexto de utilização do processamento paralelo, e optou por uma estratégia na qual todos os processadores são utilizados simultaneamente no processo de paralelização, após o final de uma iteração *backward* do processo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE). Entretanto, devido ao elevado custo computacional apresentado por esse procedimento, deve-se investigar o número de iterações inicial da PDDE a partir do qual o processo de eliminação deve ser realizado, assim como o passo entre eliminações, ou seja, o número adicional de iterações após o qual o processo de eliminação deve ser realizado novamente. Com isso, pode-se avaliar a relação custo-benefício entre o tempo adicional de processamento devido à utilização do processo de eliminação de cortes e a redução no tempo de resolução de cada subproblema de programação linear (PL) da PDDE, devido à utilização de um número menor de cortes.

Outra dificuldade dessa estratégia é a definição do domínio dos valores das variáveis de estado, para o qual a “dominância” de cada corte de Benders deve ser avaliada. Embora para o armazenamento a definição desses limites é trivial, não é claro o limite superior para as variáveis de estado associadas à

energia natural afluyente (ENA) de cada reservatório equivalente de energia (REE). Este aspecto não foi analisado em [21], pois as variáveis aleatórias apresentavam independência temporal.

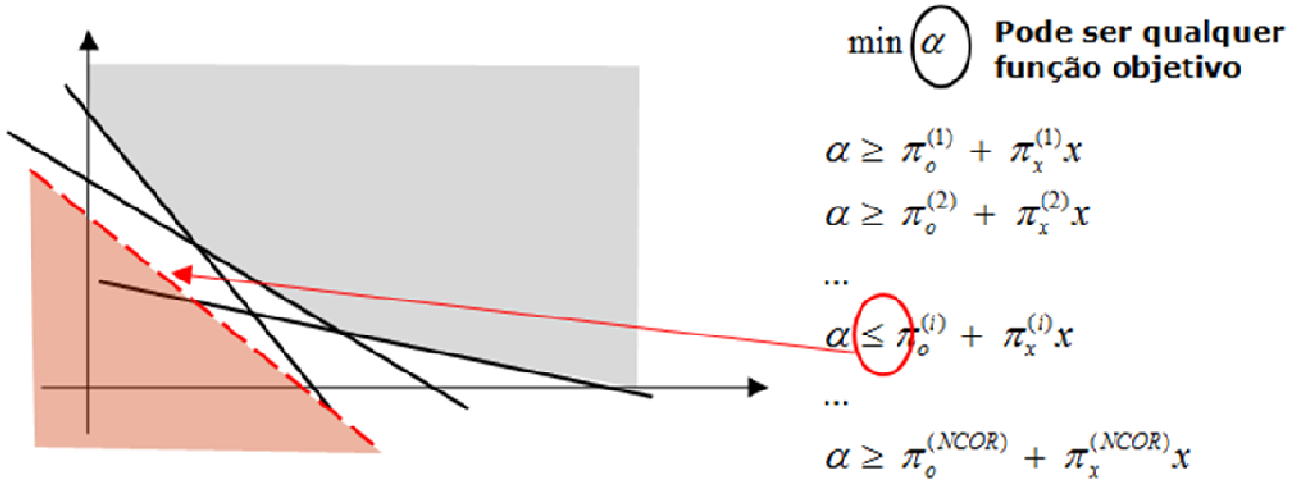


Figura 2.3 – Exemplo de corte eliminável, pelo fato do PL com o sinal do corte invertido ter se tornado inviável

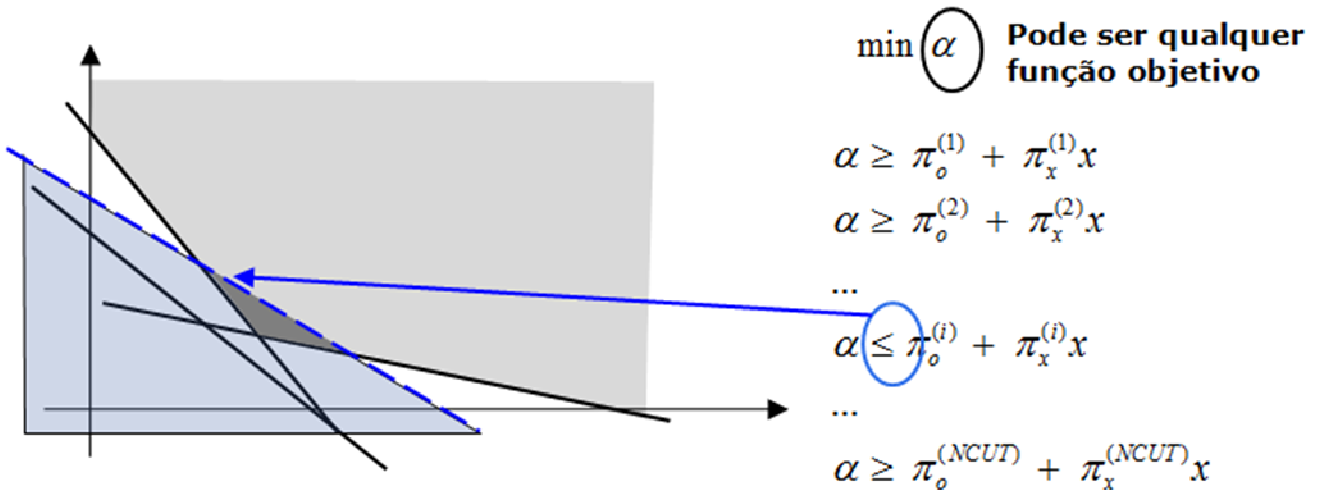


Figura 2.4 - Exemplo de corte não eliminável, pelo fato do PL com o sinal do corte invertido ter se tornado viável

Finalmente, deve-se ressaltar que essa estratégia deve ser vista como um procedimento complementar à estratégia de seleção de cortes de Benders proposta nesse relatório, com o objetivo de diminuir o número total de cortes que devem ser avaliados em relação à sua “atividade” (vide seção 3.3), durante o processo iterativo de seleção de cortes. Resultados apresentados em [22] mostram um grande potencial de eliminação de cortes, como mostrado na Figura 2.5, para um caso com 11 REEs estudado na época.

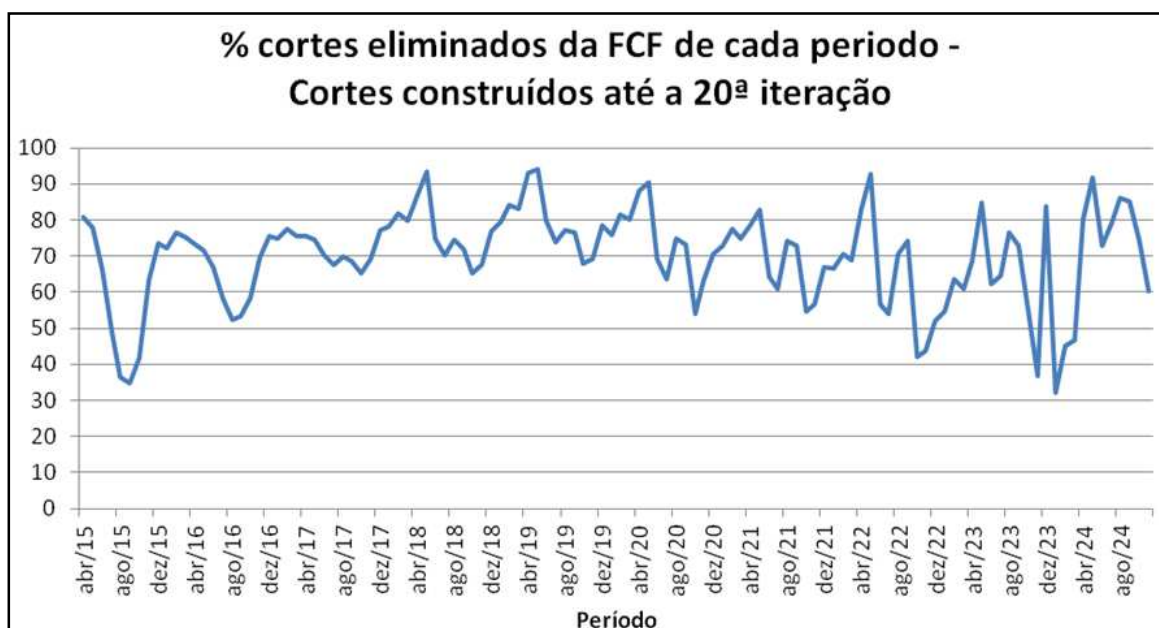


Figura 2.5 – Potencial de redução dos cortes da FCF do modelo NEWAVE, aplicando-se o procedimento de eliminação de cortes dominados.

2.3 Janela móvel para consideração de cortes

Até a versão 23 do modelo NEWAVE, consideram-se, na FCF de cada subproblema, apenas os cortes de Benders construídos nas últimas k_1 ($= 2 \times NREE$) iterações, onde $NREE$ é o número de reservatórios equivalentes de energia. Neste relatório, essa estratégia será denominada de *Estratégia TC_Janela*. Embora esse procedimento seja eficiente para reduzir o tempo por iteração quando esse valor de k_1 é atingido, podem-se descartar cortes importantes construídos em iterações longínquas, o que poderia resultar em dois inconvenientes:

- diminuição no valor do limite inferior $ZINF$, caso o corte descartado esteja na FCF do subproblema referente ao período 1, e tenha se tornado importante em determinada iteração, em uma magnitude tal que causasse uma diminuição no valor ótimo desse subproblema, em relação ao valor corrente de $ZINF$. É esperado que se o corte eliminado foi importante para o processo de convergência, causando queda no valor de $ZINF$, este deverá ser construído novamente em iterações posteriores. É importante ressaltar que a convergência da PDDE não ocorre quando há uma diminuição do valor de $ZINF$;
- esses cortes descartados podem prejudicar o processo de convergência, causando uma “falsa” estabilidade no limite inferior e, conseqüentemente, parada prematura do algoritmo.

3 Proposta de Seleção de Cortes de Benders

O procedimento de seleção de cortes de Benders proposto neste relatório, denominado *Estratégia SC*, consiste em dois passos:

- definição de um conjunto de cortes que devem ser incluídos inicialmente no PL, com base nos resultados de iterações anteriores ou da resolução de períodos adjacentes na mesma iteração da PDDE. Estes cortes têm o objetivo de fornecer uma boa sinalização inicial para o PL, de forma a acelerar o segundo passo, descrito a seguir;
- 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 corrente para o PL, e que são potenciais candidatos a estarem ativos na solução ótima.

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

3.1 Conjunto inicial de cortes de Benders a serem incluídos no PL

O objetivo desse passo é estabelecer, do ponto de vista, conceitual, quais cortes de Benders podem ser importantes, em princípio, para promover uma solução inicial do PL mais próxima da ótima. Propõem-se escolher os seguintes cortes para compor o conjunto inicial de cortes a ser incluído no PL:

- **Passos *forward* e *backward***: para cada série (estado) *isim*, período *iper* e iteração corrente *iter*, selecionar os cortes de Benders ativos nos *NLEQ* subproblemas associados a esse estado, desde a iteração (*iter* – 1) até a iteração (*iter* – k_2), onde k_2 é a janela definida para verificação dos cortes ativos;
- **Passo *backward* somente**: utilizar todos os cortes de Benders construídos no período *iper* + 1 e iteração corrente;

3.2 Conjunto de cortes de Benders a serem testados para inclusão no PL

Este conjunto consiste em todos os cortes de Benders que devem ser “testados”, a partir da solução do PL obtida com o conjunto inicial de cortes definido no item 3.1, para verificar se devem ser incluídos no PL, caso promovam um aumento na função objetivo do subproblema. Em princípio, esse conjunto deveria ser formado por todos os cortes construídos desde a iteração 1, para evitar a ocorrência dos possíveis inconvenientes da janela de cortes adotada no modelo NEWAVE, conforme

discutido na seção 2.3. Na versão 23.1.3, o parâmetro k_1 , definida naquela seção, está fixo igual ao número máximo de iterações da PDDE (=45).

A Figura 3.1 ilustra os conjuntos de cortes definidos nas seções 3.1 (cortes iniciais) e 3.2 (cortes a serem testados).

Dado um estágio (t) e estado *isim* na iteração *iter*

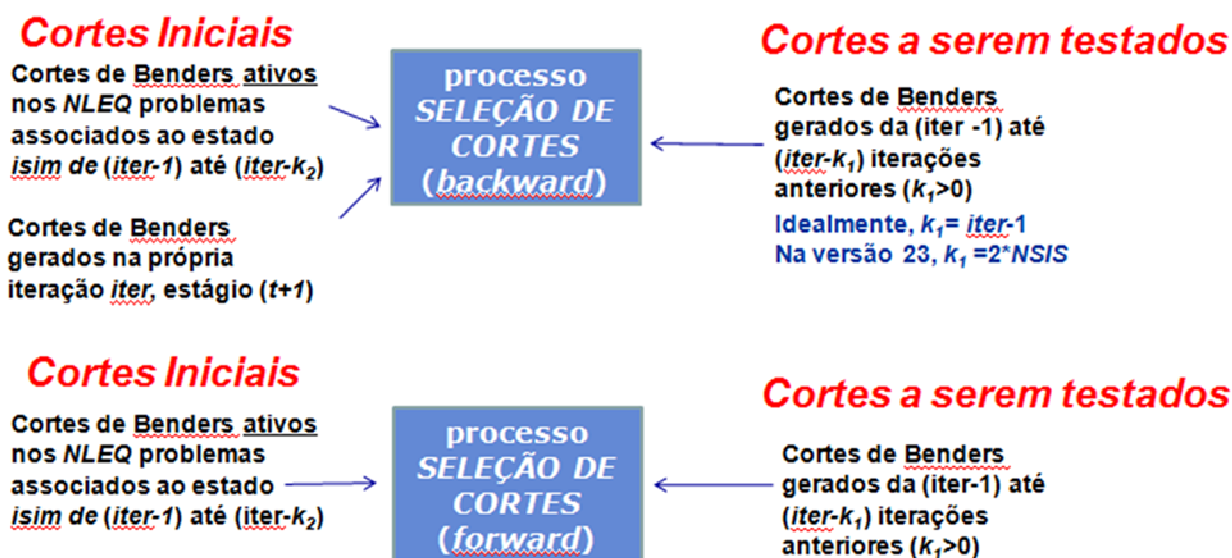


Figura 3.1 - Conjunto de cortes de Benders iniciais e a serem testados para o processo de seleção de cortes.

Observa-se que o parâmetro k_2 deve ser avaliado de forma cuidadosa, para evitar a inclusão desnecessária de cortes que ficaram ativos em iterações muito antigas.

3.3 Processo iterativo de seleção de novos cortes de Benders, para inclusão no PL

Uma vez definidos o conjunto de cortes iniciais do PL e o conjunto de cortes que devem ser testados para eventual inclusão posterior no PL, procede-se ao processo iterativo de seleção de cortes em si, que consiste no seguinte procedimento, a cada uma das iterações k para resolução do PL de determinado período, série, e abertura:

Passo 1: Resolver o PL com o conjunto de cortes que foram incluídos até então, obtendo um valor ótimo $f^{*(k)}$ para a função objetivo, e o vetor $x^{*(k)}$ de valores para as variáveis independentes (argumentos) da FCF, que são um subconjunto das variáveis de decisão do PL¹.

¹ observa-se que as afluências passadas também são argumentos da FCF, porém ao se resolver o PL seus valores já estão preenchidos com as afluências referentes à serie *forward* correspondente.

Passo 2: Calcular o valor da “atividade” α_i de cada corte i ainda não incluído no PL, através da equação (3.1):

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^{NVAR} \pi_{ij} x^{*(k)}_j, \quad (3.1)$$

onde $NVAR$ é a quantidade de componentes do vetor de variáveis da FCF e π_{ij} é o valor do coeficiente do corte i associado à variável j .

Passo 3: Selecionar os n cortes com maior valor de α_i , desde que sejam superiores ao valor $f^{*(k)}$ obtido para a função de custo futuro, na iteração corrente k . Este passo retorna um valor denominado $nadic$ (entre 0 e n) de novos cortes a serem adicionados;

Passo 4: Se $nadic = 0$, pare: o PL foi resolvido. Caso contrário, adicione no PL os $nadic$ cortes identificados no passo 3, faça $k = k + 1$ e retorne ao Passo 1.

O processo de seleção de cortes está ilustrado na Figura 3.2, onde se observam:

- à esquerda, o fluxograma do processo iterativo, onde os passos 2 e 3 estão incluídos no losango onde se verifica a necessidade de inclusão de novos cortes;
- no centro, uma representação esquemática do PL, contendo as restrições do problema e um subconjunto dos cortes da FCF que foram incluídos no PL, indicado em azul;
- abaixo do retângulo que representa o PL, o conjunto de cortes a serem testados, que não foram incluídos ainda no PL, na iteração corrente. 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 iniciais já incluídos no PL;
 - ✓ em verde, os cortes a serem incluídos na próxima iteração, que não estão dominados na solução corrente;
 - ✓ em cinza, os demais cortes candidatos que não foram necessários serem incluídos na iteração corrente.

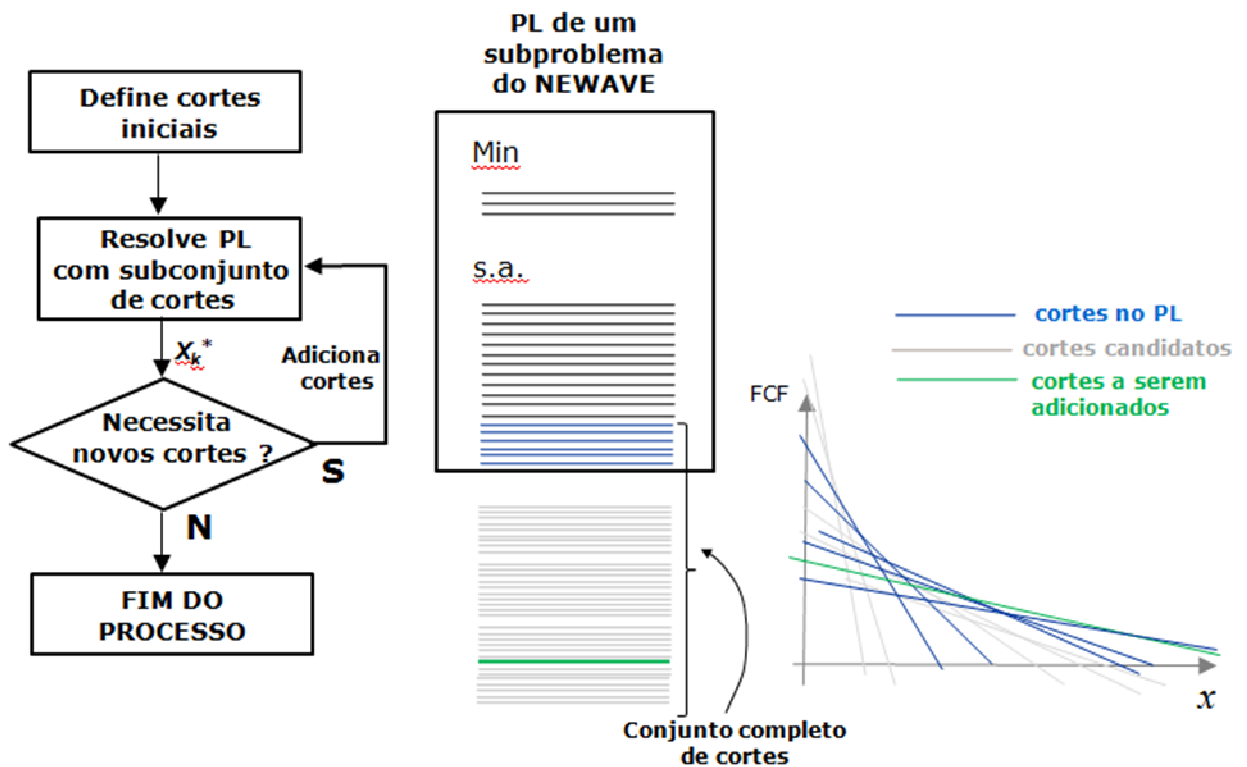
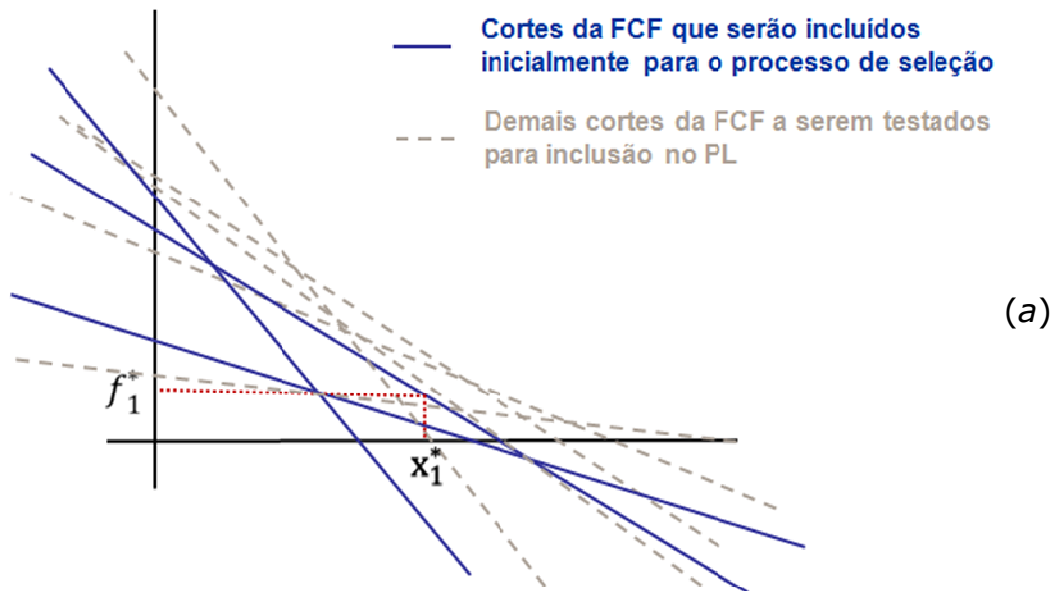


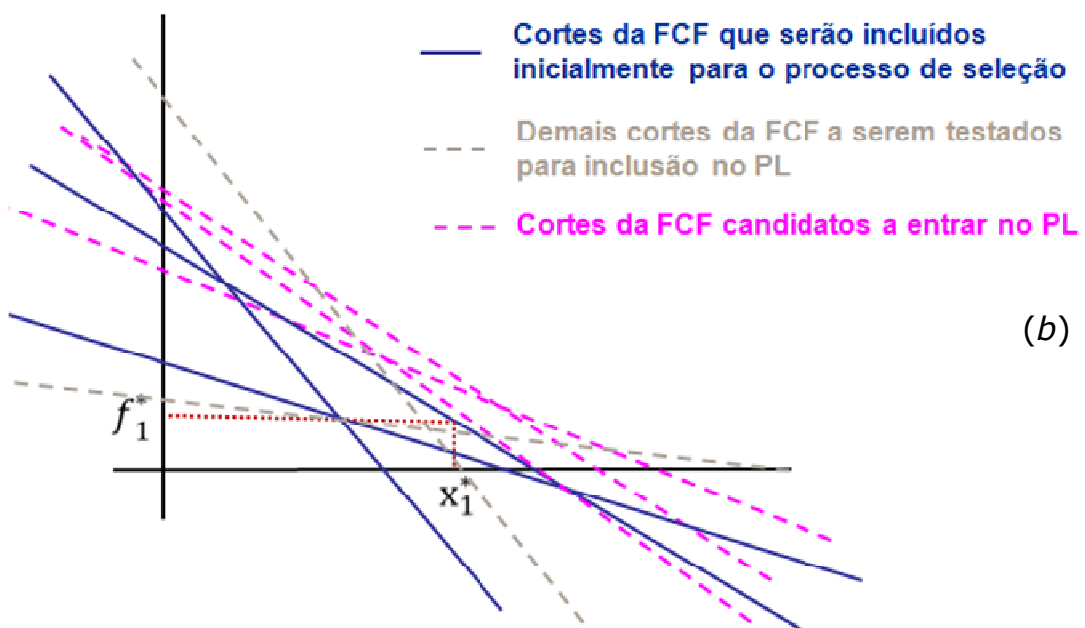
Figura 3.2 – Fluxograma do processo iterativo de seleção de cortes.

A fim de melhor ilustrar o processo, mostra-se a seguir, de forma esquemática, o passo a passo do processo iterativo, para um exemplo unidimensional da função de custo futuro. Ressalta-se que o número máximo de cortes *nadic* a serem incluídos no PL também é um parâmetro a ser calibrado, embora também não se espere que um valor suficientemente grande (ex: *nadic*=10) venha a onerar significativamente o tempo de resolução do PL.

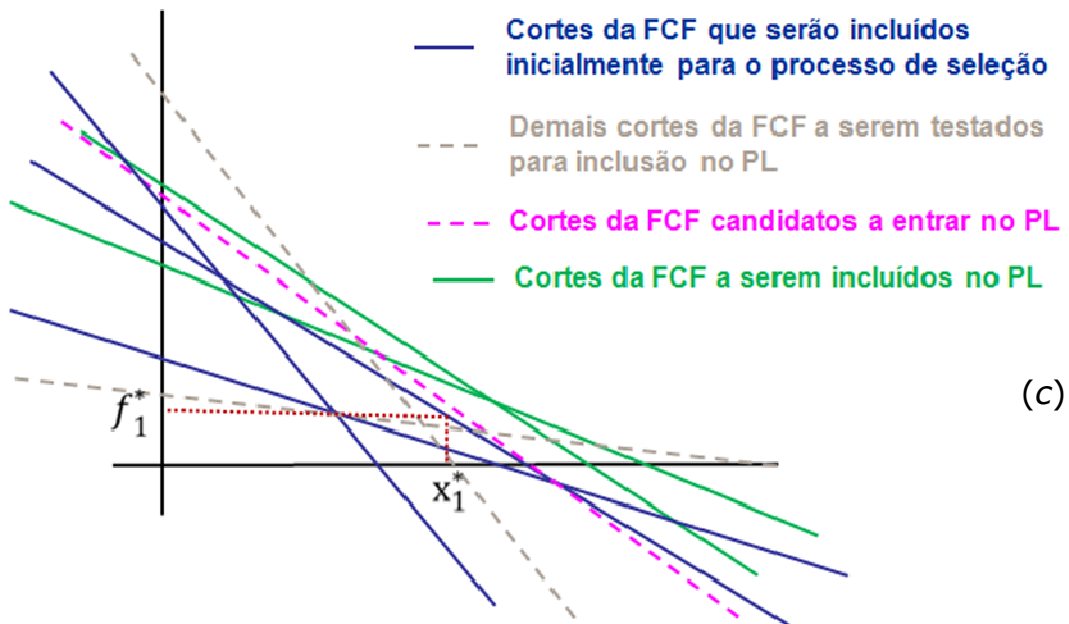
Passo 1: Resolve-se o PL1 a partir de uma base anterior. Obtêm-se x_1^ e f_1^**



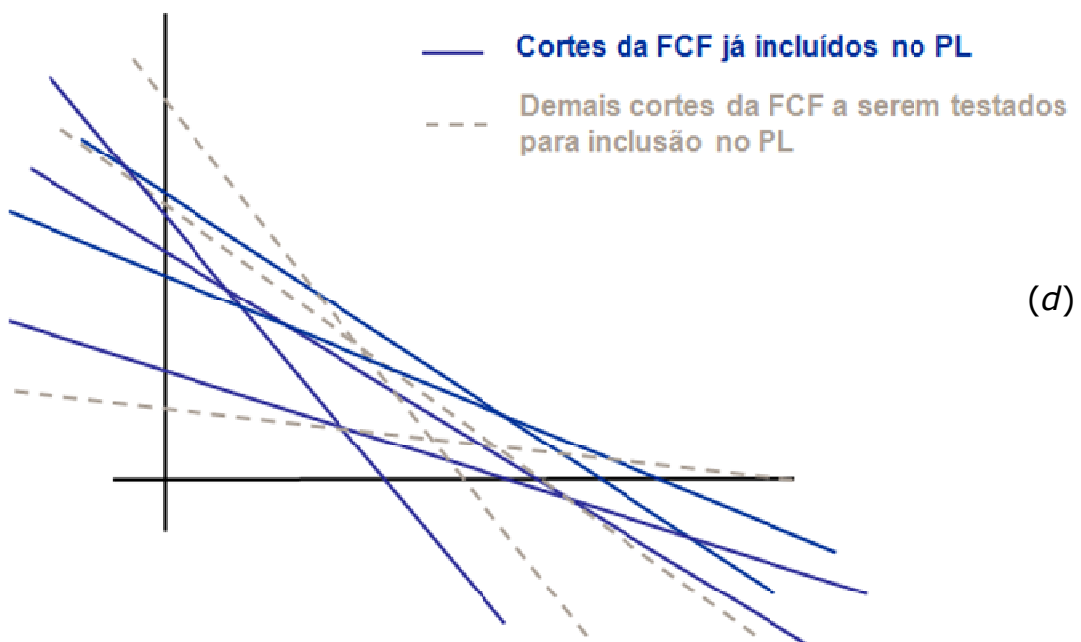
Passo 2: Inspeccionam-se os cortes de Benders que não foram adicionados ao PL1, para verificar quais apresentam, no ponto x_1^ , valores da FCF superiores a f_1^* => cortes candidatos a entrar no PL*



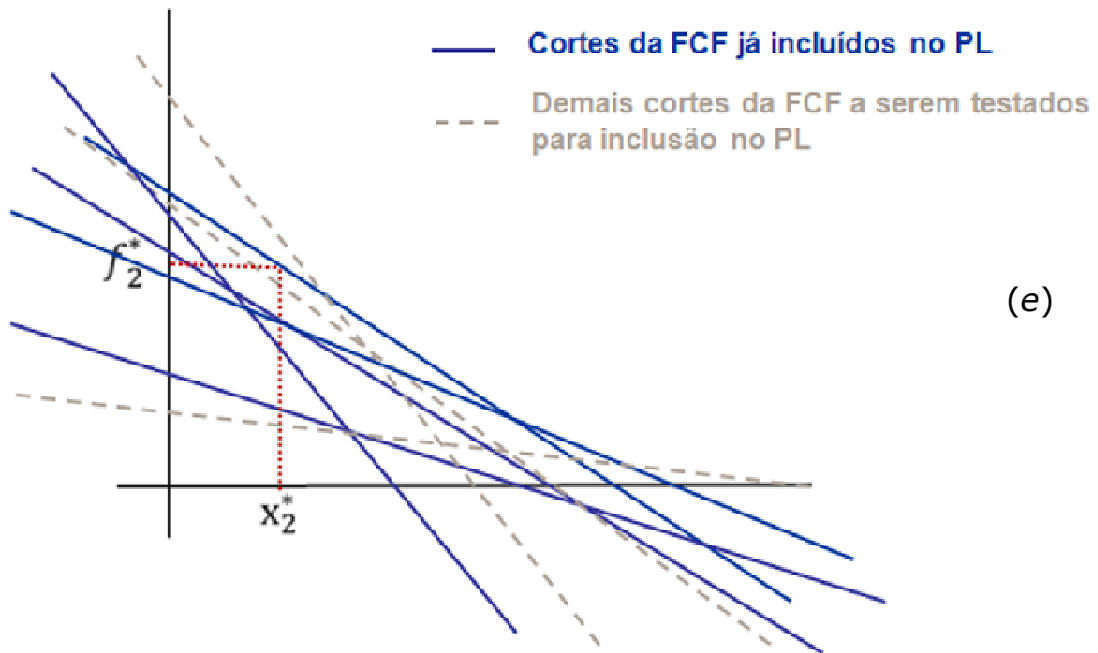
Passo 3: Seleção dos n maiores cortes, para entrar no PL
(no exemplo, $n=2$)



Passo 4: Inclusão de novos cortes no PL

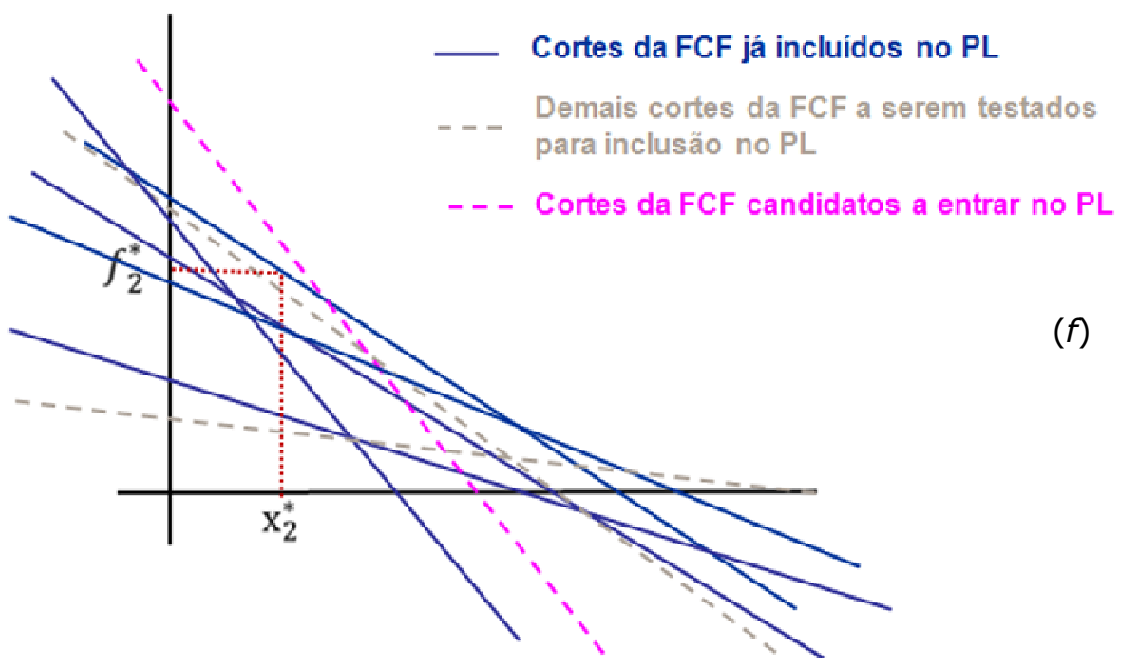


Passo 1: Resolve-se o PL2 a partir de uma base anterior. Obtêm-se x_2^* e f_2^*



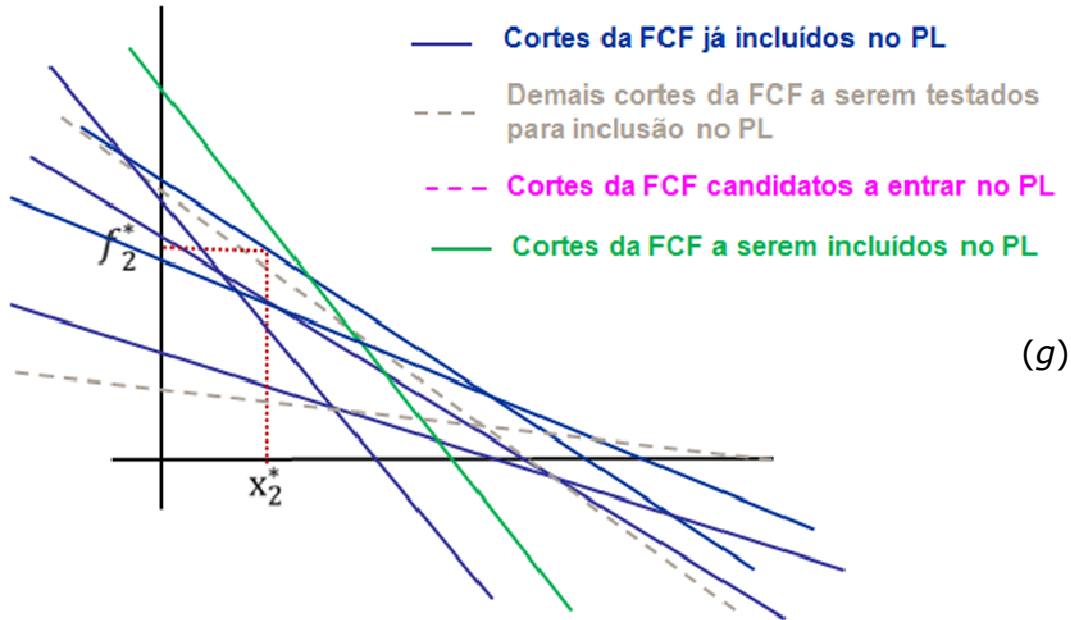
(e)

Passo 2: Inspeccionam-se os cortes de Benders que não foram adicionados ao PL1, para verificar quais apresentam, no ponto x_2^* , valores da FCF superiores a f_2^* => cortes candidatos a entrar no PL

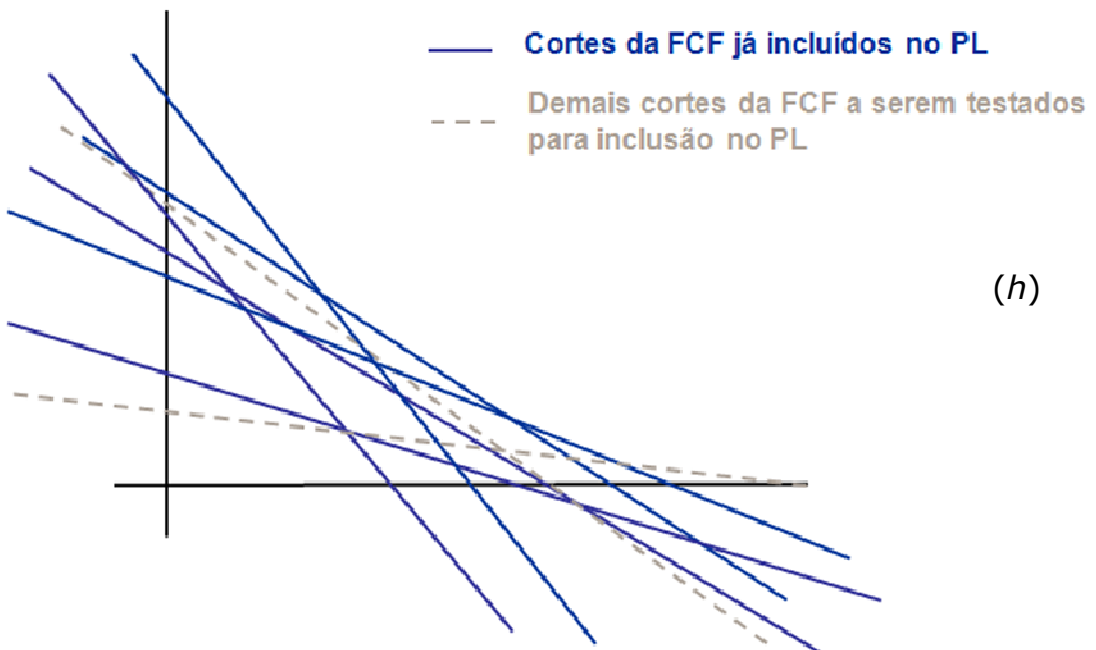


(f)

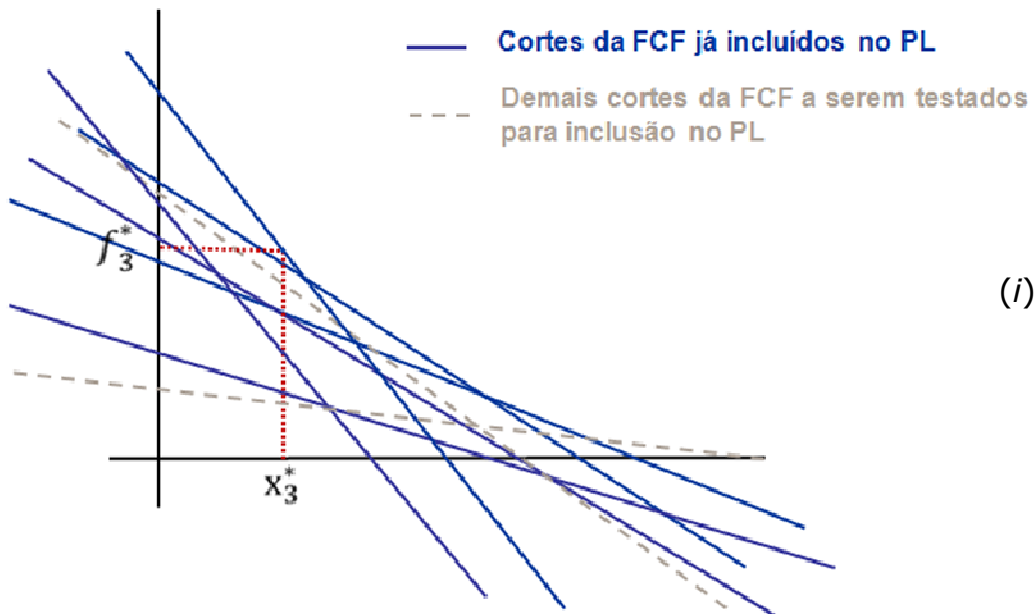
Passo 3: Seleção dos n maiores cortes, para entrar no PL
(no exemplo, $n=2$)



Passo 4: Inclusão de novos cortes no PL



Passo 1: Resolve-se o PL3 a partir de uma base anterior. Obtêm-se x_3^ e f_3^**



Passo 2: Inspeccionam-se os cortes de Benders que não foram adicionados ao PL1, para verificar quais apresentam, no ponto x_2^ , valores da FCF superiores a f_2^* => cortes candidatos a entrar no PL*

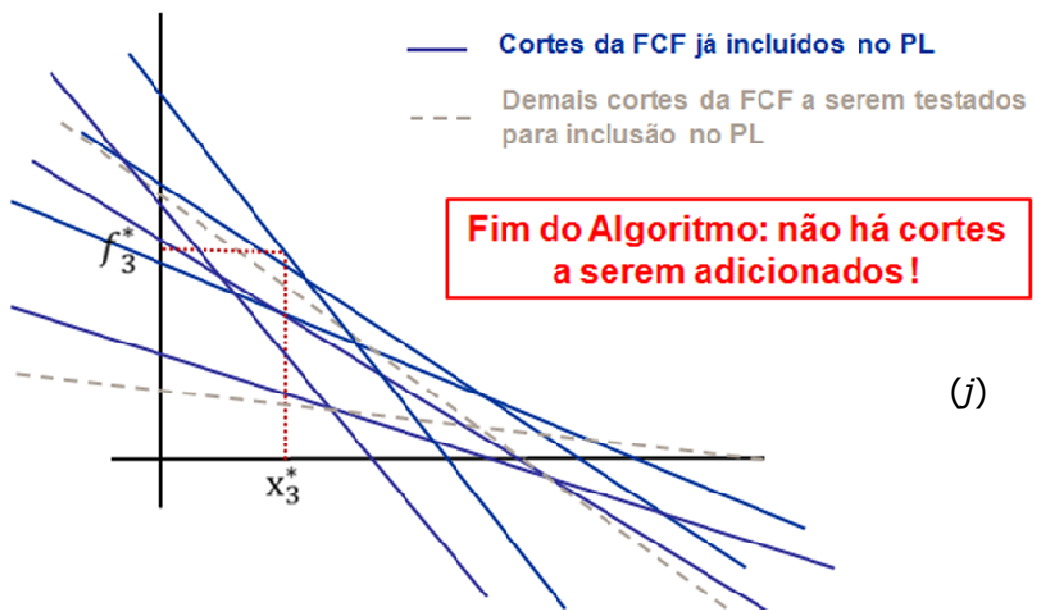


Figura 3.3 (a)-(j): Exemplo de processo iterativo de seleção de cortes.

3.4 Recuperação de base

Para que o processo de seleção tenha resultados vantajosos, é indispensável que se recupere a base de uma resolução do PL quando da solução do PL subsequente. A estratégia de recuperação de base é fundamental uma vez que, sendo a mudança nos subproblemas marginal - há a inclusão apenas de poucos novos cortes - o tempo computacional adicional para resolução do novo PL também será muito pequeno.

A versão 23 do modelo NEWAVE já faz uso da recuperação de base entre os PLs das aberturas de um mesmo cenário hidrológico, sendo esperado que este procedimento proporcione uma maior redução de tempo computacional na *Estratégia TC*, pois os PLs a serem resolvidos são maiores.

3.5 Comentários

Fazem-se algumas observações conceituais e práticas em relação à estratégia de seleção de cortes apresentada nesse documento:

3.5.1 Qualidade da política operativa com a *Estratégia SC*

A *Estratégia SC* consiste em um procedimento *exato*, onde os subproblemas de programação linear da PDDE são resolvidos *sem aproximações*. A diferença dessa estratégia em relação ao procedimento 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. Entretanto, os cortes não adicionados não promovem alteração no valor da solução ótima, por não estarem ativos.

Ressalta-se que, pelo fato de, estruturalmente, o PL da *Estratégia SC* ser diferente do PL da *Estratégia TC*, ambos os procedimentos podem levar a soluções equivalentes como resultado de determinado subproblema, i.e., soluções ligeiramente diferentes porém de mesmo custo para o PL considerado. Isto pode acarretar diferenças no processo iterativo da PDDE, já que o resultado de um subproblema fornece as condições iniciais do subproblema dos períodos seguintes. 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 como um todo é o mesmo e o critério de parada estabelecido é semelhante. Esse aspecto é analisado na seção 4.4, onde se faz uma análise de consistência entre as estratégias *SC* e *TC*.

3.5.2 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*, conforme mencionado na seção 3.5.1. Já os demais parâmetros (k_2 e *nadic*) devem ser calibrados com o único objetivo de promover a maior redução possível de tempo computacional, em média, para um conjunto de casos típicos a serem analisados (PMO, PLD, GF, PDE e Leilões).

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.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção serão apresentados resultados de aplicação do método de seleção de cortes de Benders (*Estratégia SC*) no modelo NEWAVE, comparando-os com os resultados obtidos tanto com a alternativa de sempre incluir todos os cortes no PL (*Estratégia TC*), quanto com a alternativa que considera apenas os cortes de Benders construídos nas últimas $k_1 (= 2 \times NREE) = 18$ iterações, sem fazer seleção de cortes (*Estratégia TC_Janela*). Serão avaliados resultados referentes ao tempo computacional, consistência e qualidade dos resultados.

Na versão 23.1.3 do modelo NEWAVE, o método de seleção de cortes de Benders foi aplicado somente à recursão backward, que corresponde à maior parte do esforço computacional para resolver o problema.

4.1 Descrição do caso

Para a avaliação do impacto da aplicação do método de seleção de cortes de Benders, foram realizadas simulações com configurações de Programas Mensais de Operação (PMO) e de Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), listadas na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 – Casos estudos considerados na avaliação da estratégia SC.

PMO Dez 2016	PMO Abr 2017
PMO Jan 2017	PMO Mai 2017
PMO Fev 2017	PDE 2024
PMO Mar 2017	

4.2 Parâmetros considerados

Os seguintes valores dos parâmetros do processo de seleção de cortes de Benders são considerados neste relatório:

- Todos os cortes construídos desde a primeira iteração serão testados ($k_1 = 45$);
- Janela para verificação dos cortes ativos das iterações anteriores que formarão o conjunto inicial de cortes a serem incluídos no PL (K_2): 5, 10, 15, 20 e 45;
- Número máximo de novos cortes a serem adicionados ao processo de seleção de cortes por iteração (*nadic*): 5, 10 e 15;
- O processo de seleção de cortes é aplicado a partir da segunda iteração do algoritmo de PDDE;

4.3 Análise de desempenho: estratégia SC X estratégia TC

Nesta seção apresenta-se uma análise comparativa do desempenho entre as *estratégias SC* e *TC*, em relação ao tempo computacional para resolução dos problemas de programação linear e, conseqüentemente, para o processo total de convergência do modelo NEWAVE.

4.3.1 Redução no tempo de resolução dos PLs

Inicialmente, foi realizada uma análise da redução do tempo computacional exclusivamente na resolução dos problemas de programação linear, no modelo NEWAVE. Para tal, desenvolveu-se um módulo à parte do modelo, que se destinava unicamente a receber os subproblemas ("PLs") do programa (via arquivos binários, preservando assim a precisão numérica) e resolvê-los pelas estratégias *TC* e *SC*, de forma independente.

Para que a comparação fosse mais abrangente, consideraram-se PLs de diferentes iterações da PDDE, séries *forward* e períodos de tempo. Os testes foram realizados para o PMO de Abr 2017, considerando, na *estratégia SC*, os parâmetros $k_1 = iter - 1$, $k_2 = iter - 1$, e $nadic = 2$. As tabelas a seguir indicam as reduções de tempo obtidas na *estratégia SC*, em relação à *estratégia TC_Janela*, para as variantes consideradas. As últimas linhas da tabela mostram as reduções médias que se obteriam para a aplicação da *estratégia SC* em três situações: aplicando-a desde o início, a partir da iteração 3, ou a partir da iteração 6.

Tabela 4.2 - Reduções de tempo da *Estratégia SC* em relação à *Estratégia TC*, para as séries 1, 50 e 75, do mês de abril

Iteração	Abril 2017 - Série 1 (p04-s001)				Abril 2017 - Série 50 (p04-s050)				Abril 2017 - Série 75 (p04-s075)			
	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%
2	64	107	-43	-67,19	72	89	-17	-23,61	68	112	-44	-64,71
3	84	99	-15	-17,86	144	107	37	25,69	101	109	-8	-7,92
4	109	103	6	5,50	198	117	81	40,91	149	122	27	18,12
5	118	107	11	9,32	208	120	88	42,31	155	122	33	21,29
6	138	113	25	18,12	253	125	128	50,59	185	140	45	24,32
7	143	112	31	21,68	257	123	134	52,14	197	134	63	31,98
8	193	114	79	40,93	284	143	141	49,65	269	155	114	42,38
9	178	113	65	36,52	316	144	172	54,43	233	150	83	35,62
10	215	106	109	50,70	413	161	252	61,02	321	169	152	47,35
11	233	119	114	48,93	412	162	250	60,68	296	195	101	34,12
12	338	122	216	63,91	529	173	356	67,30	396	221	175	44,19
13	330	125	205	62,12	477	169	308	64,57	384	221	163	42,45
14	342	127	215	62,87	561	185	376	67,02	468	259	209	44,66
15	364	135	229	62,91	602	189	413	68,60	419	279	140	33,41
16	343	128	215	62,68	714	204	510	71,43	597	293	304	50,92
17	410	145	265	64,63	667	220	447	67,02	552	320	232	42,03
18	462	146	316	68,40	708	209	499	70,48	623	358	265	42,54
19	401	144	257	64,09	623	210	413	66,29	547	356	191	34,92
20	527	161	366	69,45	788	236	552	70,05	727	405	322	44,29
21	458	167	291	63,54	708	257	451	63,70	561	982	-421	-75,04
22	574	177	397	69,16	929	269	660	71,04	694	471	223	32,13
23	601	173	428	71,21	928	273	655	70,58	800	516	284	35,50
Total	6625	2843	3782	57,09	10791	3885	6906	64,00	8742	6089	2653	30,35
SC da 6 em diante	6625	2802	3823	57,71	10791	4074	6717	62,25	8742	6097	2645	30,26
SC da 3 em diante	6625	2785	3840	57,96	10791	3905	6886	63,81	8742	6037	2705	30,94

Tabela 4.3 - Reduções de tempo da *Estratégia SC* em relação à *Estratégia TC*, para as séries 100, 125 e 150, do mês de abril

Iteração	Abril 2017 - Série 100 (p04-s100)				Abril 2017 - Série 125 (p04-s125)				Abril 2017 - Série 150 (p04-s150)			
	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%
2	69	97	-28	-40,58	64	111	-47	-73,44	73	112	-39	-53,42
3	127	110	17	13,39	83	104	-21	-25,30	105	97	8	7,62
4	197	141	56	28,43	136	97	39	28,68	161	104	57	35,40
5	195	172	23	11,79	131	112	19	14,50	151	101	50	33,11
6	237	170	67	28,27	191	130	61	31,94	177	118	59	33,33
7	262	189	73	27,86	154	127	27	17,53	184	134	50	27,17
8	306	233	73	23,86	216	132	84	38,89	239	128	111	46,44
9	261	207	54	20,69	191	135	56	29,32	233	140	93	39,91
10	381	256	125	32,81	280	144	136	48,57	301	148	153	50,83
11	360	266	94	26,11	255	150	105	41,18	336	148	188	55,95
12	495	306	189	38,18	398	161	237	59,55	462	158	304	65,80
13	472	354	118	25,00	354	156	198	55,93	401	153	248	61,85
14	480	390	90	18,75	391	134	257	65,73	413	132	281	68,04
15	571	443	128	22,42	421	137	284	67,46	430	137	293	68,14
16	590	477	113	19,15	378	162	216	57,14	573	154	419	73,12
17	576	527	49	8,51	464	151	313	67,46	559	160	399	71,38
18	664	592	72	10,84	486	163	323	66,46	581	164	417	71,77
19	604	609	-5	-0,83	449	173	276	61,47	517	157	360	69,63
20	735	689	46	6,26	555	178	377	67,93	646	168	478	73,99
21	701	736	-35	-4,99	495	182	313	63,23	542	189	353	65,13
22	800	798	2	0,25	648	193	455	70,22	724	200	524	72,38
23	765	887	-122	-15,95	715	199	516	72,17	711	203	508	71,45
Total	9848	8649	1199	12,18	7455	3231	4224	56,66	8519	3205	5314	62,38
SC da 6 em diante	9848	8717	1131	11,48	7455	3221	4234	56,79	8519	3281	5238	61,49
SC da 3 em diante	9848	8638	1210	12,29	7455	3163	4292	57,57	8519	3174	5345	62,74

Tabela 4.4 - Reduções de tempo da *Estratégia SC* em relação à *Estratégia TC*, para as séries 175 e 200, do mês de abril

Iteração	Abril 2017 - Série 175 (p04-s175)				Abril 2017 - Série 200 (p04-s200)			
	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%
2	66	95	-29	-43,94	73	97	-24	-32,88
3	114	106	8	7,02	116	97	19	16,38
4	103	109	-6	-5,83	145	118	27	18,62
5	146	123	23	15,75	157	147	10	6,37
6	150	128	22	14,67	185	129	56	30,27
7	195	123	72	36,92	209	124	85	40,67
8	188	129	59	31,38	221	140	81	36,65
9	239	136	103	43,10	255	155	100	39,22
10	240	149	91	37,92	292	161	131	44,86
11	326	150	176	53,99	326	178	148	45,40
12	326	143	183	56,13	409	200	209	51,10
13	361	145	216	59,83	414	206	208	50,24
14	331	157	174	52,57	444	225	219	49,32
15	445	188	257	57,75	520	243	277	53,27
16	415	191	224	53,98	568	275	293	51,58
17	442	196	246	55,66	529	292	237	44,80
18	479	213	266	55,53	512	310	202	39,45
19	552	234	318	57,61	529	348	181	34,22
20	500	251	249	49,80	593	362	231	38,95
21	498	244	254	51,00	675	404	271	40,15
22	583	271	312	53,52	754	455	299	39,66
23	633	296	337	53,24	707	433	274	38,76
Total	7332	3777	3555	48,49	8633	5099	3534	40,94
SC da 6 em diante	7332	3773	3559	48,54	8633	5131	3502	40,57
SC da 3 em diante	7332	3756	3576	48,77	8633	5094	3539	40,99

Tabela 4.5 - Reduções de tempo da *Estratégia SC* em relação à *Estratégia TC*, para as séries 1, 50 e 75, do mês de dezembro

Iteração	Dezembro 2017 - Série 1 (p12-s001)				Dezembro 2017 - Série 50 (p12-s050)				Dezembro 2017 - Série 75 (p12-s075)			
	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%
2	86	90	-4	-4,65	96	112	-16	-16,67	80	96	-16	-20,00
3	118	110	8	6,78	143	111	32	22,38	113	138	-25	-22,12
4	187	105	82	43,85	129	114	15	11,63	166	107	59	35,54
5	211	136	75	35,55	231	126	105	45,45	220	140	80	36,36
6	248	157	91	36,69	189	112	77	40,74	238	121	117	49,16
7	253	153	100	39,53	264	145	119	45,08	231	144	87	37,66
8	276	220	56	20,29	268	130	138	51,49	246	156	90	36,59
9	296	167	129	43,58	325	149	176	54,15	331	166	165	49,85
10	324	194	130	40,12	363	147	216	59,50	353	142	211	59,77
11	369	187	182	49,32	420	137	283	67,38	345	125	220	63,77
12	483	210	273	56,52	481	141	340	70,69	456	141	315	69,08
13	465	221	244	52,47	387	146	241	62,27	411	145	266	64,72
14	514	203	311	60,51	586	145	441	75,26	491	152	339	69,04
15	529	271	258	48,77	511	155	356	69,67	536	161	375	69,96
16	527	381	146	27,70	527	144	383	72,68	559	150	409	73,17
17	594	420	174	29,29	669	159	510	76,23	689	172	517	75,04
18	674	287	387	57,42	695	183	512	73,67	579	160	419	72,37
19	726	450	276	38,02	800	205	595	74,38	715	177	538	75,24
20	837	379	458	54,72	747	179	568	76,04	731	187	544	74,42
21	751	377	374	49,80	734	212	522	71,12	698	195	503	72,06
22	725	348	377	52,00	921	177	744	80,78	780	186	594	76,15
23	903	378	525	58,14	883	194	689	78,03	924	215	709	76,73
Total	10096	5444	4652	46,08	10369	3323	7046	67,95	9892	3376	6516	65,87
SC da 6 em diante	10096	5605	4491	44,48	10369	3459	6910	66,64	9892	3474	6418	64,88
SC da 3 em diante	10096	5448	4648	46,04	10369	3339	7030	67,80	9892	3335	6557	66,29

Tabela 4.6 - Reduções de tempo da *Estratégia SC* em relação à *Estratégia TC*, para as séries 100, 125 e 150, e o mês de dezembro

Iteração	Dezembro 2017 - Série 100 (p12-s100)				Dezembro 2017 - Série 125 (p12-s125)				Dezembro 2017 - Série 150 (p12-s150)			
	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%
2	85	104	-19	-22,35	80	98	-18	-22,50	75	102	-27	-36,00
3	156	108	48	30,77	122	113	9	7,38	131	95	36	27,48
4	128	116	12	9,38	149	102	47	31,54	158	119	39	24,68
5	232	111	121	52,16	189	107	82	43,39	220	136	84	38,18
6	206	121	85	41,26	176	116	60	34,09	210	123	87	41,43
7	270	136	134	49,63	220	128	92	41,82	227	136	91	40,09
8	236	128	108	45,76	207	123	84	40,58	230	176	54	23,48
9	338	156	182	53,85	313	155	158	50,48	315	148	167	53,02
10	320	139	181	56,56	283	144	139	49,12	297	209	88	29,63
11	515	147	368	71,46	384	144	240	62,50	404	162	242	59,90
12	381	131	250	65,62	397	168	229	57,68	355	234	121	34,08
13	519	125	394	75,92	353	133	220	62,32	353	210	143	40,51
14	477	131	346	72,54	397	142	255	64,23	446	288	158	35,43
15	587	130	457	77,85	487	135	352	72,28	464	244	220	47,41
16	478	137	341	71,34	498	131	367	73,69	502	242	260	51,79
17	657	162	495	75,34	587	158	429	73,08	545	248	297	54,50
18	652	155	497	76,23	499	169	330	66,13	563	411	152	27,00
19	665	165	500	75,19	540	160	380	70,37	647	489	158	24,42
20	802	153	649	80,92	659	153	506	76,78	675	378	297	44,00
21	912	155	757	83,00	556	157	399	71,76	687	283	404	58,81
22	875	197	678	77,49	714	187	527	73,81	794	557	237	29,85
23	931	179	752	80,77	803	182	621	77,33	774	345	429	55,43
Total	10422	3086	7336	70,39	8613	3105	5508	63,95	9072	5335	3737	41,19
SC da 6 em diante	10422	3248	7174	68,84	8613	3225	5388	62,56	9072	5467	3605	39,74
SC da 3 em diante	10422	3115	7307	70,11	8613	3096	5517	64,05	9072	5344	3728	41,09

Tabela 4.7 - Reduções de tempo da *Estratégia SC* em relação à *Estratégia TC*, para as séries 175 e 200, e o mês de dezembro

Iteração	Dezembro 2017 - Série 175 (p12-s175)				Dezembro 2017 - Série 200 (p12-s200)			
	TC	SC	Dif	%	TC	SC	Dif	%
2	60	99	-39	-65,00	89	105	-16	-17,98
3	115	89	26	22,61	121	108	13	10,74
4	152	116	36	23,68	147	108	39	26,53
5	176	112	64	36,36	214	126	88	41,12
6	170	126	44	25,88	203	114	89	43,84
7	170	122	48	28,24	245	123	122	49,80
8	223	126	97	43,50	232	137	95	40,95
9	180	139	41	22,78	340	142	198	58,24
10	307	156	151	49,19	335	152	183	54,63
11	275	137	138	50,18	403	157	246	61,04
12	317	158	159	50,16	390	170	220	56,41
13	331	165	166	50,15	412	185	227	55,10
14	423	131	292	69,03	459	179	280	61,00
15	446	144	302	67,71	510	179	331	64,90
16	527	153	374	70,97	420	170	250	59,52
17	500	161	339	67,80	618	198	420	67,96
18	552	164	388	70,29	579	187	392	67,70
19	592	165	427	72,13	594	202	392	65,99
20	717	179	538	75,03	780	214	566	72,56
21	625	171	454	72,64	616	200	416	67,53
22	571	190	381	66,73	806	239	567	70,35
23	731	176	555	75,92	787	289	498	63,28
Total	8160	3179	4981	61,04	9300	3684	5616	60,39
SC da 6 em diante	8160	3266	4894	59,98	9300	3808	5492	59,05
SC da 3 em diante	8160	3166	4994	61,20	9300	3681	5619	60,42

Observa-se que as reduções médias variam de acordo com a série e o período, conforme mostra a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resumo das reduções da *Estratégia SC* em relação à *Estratégia TC*, para diversas séries e períodos

série	SC em todas iterações								SC a partir da 6ª iteração							
	1	50	75	100	125	150	175	200	1	50	75	100	125	150	175	200
Abril	57,09	64,00	30,35	12,18	56,66	62,38	48,49	40,94	57,71	62,25	30,26	11,48	56,79	61,49	48,54	40,57
Dez	46,08	67,95	65,87	70,39	63,95	41,19	61,04	60,39	44,48	66,64	64,88	68,84	62,56	39,74	59,98	59,05

Finalmente, a Tabela 4.9 mostra um resumo geral das reduções obtidas, para os dois períodos considerados e as três variantes do método SC. De forma geral, observa-se que a redução de tempo gira em torno de 50%.

Tabela 4.9 - Resumo geral da redução de tempo (média entre as séries), para os dois períodos considerados e as três variantes de aplicação da estratégia SC.

Media:	SC todas	SC 6a	SC 3a
Abril	46,51	46,13	44,48
Dez	59,61	58,27	60,24

4.3.2 Redução no tempo total de execução do NEWAVE

As reduções de tempo indicadas na seção anterior são superiores às que se deve obter com o modelo NEWAVE, por dois motivos:

- o tempo total de execução do NEWAVE não corresponde apenas à resolução de PLs, pois há também os tempos para montar os subproblemas, construir os cortes de Benders, e realizar toda a troca de informações entre os processadores;
- como o processo de seleção envolve armazenamento e troca de informações referente aos cortes ativos entre processadores, há um tempo adicional de processamento ao se ativar o processo de seleção.

A Tabela 4.10 mostra uma comparação entre os tempos totais de execução do PMO Dez 2016 e também entre os tempos para cálculo da política de operação (recursão *backward* e *forward*) com a *Estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *Estratégia TC* e com a estratégia TC adotando-se o procedimento de considerar, na FCF de cada subproblema, apenas os cortes construídos nas últimas 18 iterações (PMO) ou 20 iterações (PDE), denominada *Estratégia TC_Janela*.

Tabela 4.10 - Redução do tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Dez 2016

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2016-12	TC	30	002h 58min 26s	003h 26min 28s	10706	356,867
PMO-2016-12	TC_Janela	26	002h 06min 41s	002h 34min 11s	7601	292,346
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=5	27	001h 26min 01s	001h 54min 05s	5161	191,148
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=10	30	001h 50min 03s	002h 18min 40s	6603	220,100
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=20	28	001h 37min 23s	002h 05min 11s	5843	208,679
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=45	30	001h 48min 49s	002h 19min 07s	6529	217,633
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=5	27	001h 53min 04s	002h 22min 23s	6784	251,259
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=10	30	001h 45min 46s	002h 15min 22s	6346	211,533
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=20	28	001h 38min 59s	002h 06min 55s	5939	212,107
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=45	30	001h 59min 57s	002h 29min 01s	7197	239,900
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=5	27	001h 34min 11s	002h 02min 26s	5651	209,296
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=10	30	001h 48min 39s	002h 17min 04s	6519	217,300
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=20	28	001h 42min 38s	002h 10min 59s	6158	219,929
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=45	30	001h 51min 03s	002h 20min 04s	6663	222,100

Observa-se que a maior redução no tempo computacional médio por iteração da PDDE foi obtida para os parâmetros $nadic=5$ e $k_2=5$, na ordem de **46%** quando comparada à *Estratégia TC* e na ordem de **35%** quando comparada à *Estratégia TC_Janela*.

A Tabela 4.11 mostra uma comparação entre os tempos totais de execução do PMO Jan 2017 e também entre os tempos para cálculo da política de operação com a *Estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *Estratégia TC* e com a *Estratégia TC_Janela*.

Tabela 4.11 - Redução do tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Jan 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2017-01	TC	24	002h 13min 38s	002h 43min 59s	8018	334,083
PMO-2017-01	TC_Janela	22	001h 42min 51s	002h 10min 23s	6171	280,500
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=5	28	001h 50min 04s	002h 20min 48s	6604	235,857
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=10	26	001h 29min 37s	001h 58min 06s	5377	206,808
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=20	26	001h 57min 08s	002h 27min 52s	7028	270,308
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=45	26	001h 30min 18s	001h 58min 54s	5418	208,385
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=5	22	001h 05min 31s	001h 33min 38s	3931	178,682
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=10	24	001h 17min 28s	001h 46min 31s	4648	193,667
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=20	28	001h 42min 16s	002h 10min 57s	6136	219,143
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=45	25	001h 24min 46s	001h 53min 17s	5086	203,440
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=5	22	001h 11min 53s	001h 41min 14s	4313	196,045
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=10	24	001h 17min 47s	001h 46min 23s	4667	194,458
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=20	28	001h 43min 53s	002h 12min 29s	6233	222,607
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=45	25	001h 49min 42s	002h 20min 06s	6582	263,280

Neste PMO, a maior redução observada no tempo computacional médio por iteração da PDDE foi obtida para os parâmetros $nadic=10$ e $k_2=5$, na ordem de **46%** quando comparada à *Estratégia TC* e na ordem de **36%** quando comparada à *Estratégia TC_Janela*.

A Tabela 4.12 mostra uma comparação entre os tempos totais de execução do PMO Fev 2017 e também entre os tempos para cálculo da política de operação com a *Estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *Estratégia TC* e com a *Estratégia TC_Janela*.

Tabela 4.12 - Redução do tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Fev 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2017-02	TC	22	001h 45min 03s	002h 12min 52s	6303	286,500
PMO-2017-02	TC_Janela	22	001h 42min 56s	002h 10min 31s	6125	278,409
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=5	18	000h 46min 17s	001h 13min 29s	2777	154,278
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=10	22	001h 13min 20s	001h 42min 08s	4400	200,000
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=20	22	001h 07min 05s	001h 35min 54s	4025	182,955
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=45	22	001h 07min 41s	001h 35min 25s	4061	184,591
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=5	18	000h 46min 33s	001h 14min 54s	2793	155,167
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=10	22	001h 05min 47s	001h 34min 44s	3947	179,409
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=20	22	001h 07min 49s	001h 35min 38s	4069	184,955
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=45	22	001h 06min 52s	001h 36min 40s	4012	182,364
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=5	18	000h 59min 34s	001h 28min 27s	3574	198,556
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=10	22	001h 14min 02s	001h 42min 33s	4442	201,909
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=20	22	001h 06min 52s	001h 34min 40s	4012	182,364
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=45	22	001h 08min 09s	001h 36min 07s	4089	185,864

Observa-se que a maior redução no tempo computacional foi obtida para os parâmetros *nadic=5* e $k_2=5$ e na ordem de **56%** quando comparada à *Estratégia TC* e na ordem de **54%** quando comparada à *Estratégia TC_Janela*.

A Tabela 4.13 mostra uma comparação entre os tempos totais de execução do PMO Mar 2017 e também entre os tempos para cálculo da política de operação com a *Estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *Estratégia TC* e com a *Estratégia TC_Janela*.

Tabela 4.13 - Redução do tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Mar 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2017-03	TC	30	003h 18min 34s	003h 49min 48s	11914	397,133
PMO-2017-03	TC_Janela	28	002h 45min 38s	003h 15min 42s	9938	354,929
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=5	24	001h 16min 22s	001h 44min 29s	4582	190,917
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=10	23	001h 11min 54s	001h 39min 58s	4314	187,565
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=20	31	002h 17min 37s	002h 47min 52s	8257	266,355
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=45	27	002h 05min 40s	002h 35min 59s	7540	279,259
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=5	24	001h 16min 00s	001h 44min 11s	4560	190,000
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=10	23	001h 14min 44s	001h 44min 45s	4484	194,957
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=20	25	001h 23min 38s	001h 53min 54s	5018	200,720
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=45	31	002h 04min 30s	002h 33min 33s	7470	240,968
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=5	24	001h 17min 41s	001h 46min 16s	4661	194,208
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=10	23	001h 10min 33s	001h 39min 08s	4233	184,043
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=20	25	001h 25min 40s	001h 55min 46s	5140	205,600
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=45	31	002h 05min 50s	002h 35min 28s	7550	243,548

A maior redução no tempo computacional médio por iteração da PDDE para este PMO foi obtida para os parâmetros $nadic=15$ e $k_2=10$ e na ordem de **54%** quando comparada à *Estratégia TC* e na ordem de 48% quando comparada à *Estratégia TC Janela*.

A Tabela 4.13 mostra uma comparação entre os tempos totais de execução do PMO Abr 2017 e também entre os tempos para cálculo da política de operação com a *Estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *Estratégia TC* e com a *Estratégia TC Janela*.

Tabela 4.14 - Redução do tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Abr 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2017-04	TC	24	002h 04min 52s	002h 34min 04s	7492	312,167
PMO-2017-04	TC_Janela	26	002h 14min 56s	002h 43min 44s	8096	311,385
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=5	26	001h 25min 06s	001h 53min 23s	5106	196,385
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=10	29	001h 56min 19s	002h 26min 01s	6979	240,655
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=20	26	001h 30min 19s	001h 58min 50s	5419	208,423
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=45	26	001h 30min 28s	001h 58min 49s	5428	208,769
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=5	26	001h 25min 37s	001h 54min 03s	5137	197,577
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=10	29	001h 47min 05s	002h 16min 26s	6425	221,552
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=20	26	001h 32min 44s	002h 01min 52s	5564	214,000
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=45	26	001h 37min 56s	002h 06min 50s	5876	226,000
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=5	26	001h 26min 38s	001h 55min 06s	5198	199,923
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=10	29	001h 46min 36s	002h 15min 11s	6396	220,552
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=20	26	001h 56min 38s	002h 26min 49s	6998	269,154
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=45	26	001h 29min 23s	001h 57min 38s	5363	206,269

Observa-se que a maior redução no tempo computacional médio por iteração da PDDE foi obtida para os parâmetros $nadic=5$ e $k_2=5$ e na ordem de **37%** quando comparada à *Estratégia TC* e na ordem de **37%** quando comparada à *Estratégia TC_Janela*.

A Tabela 4.15 mostra uma comparação entre os tempos totais de execução do PMO Mai 2017 e também entre os tempos para cálculo da política de operação com a *Estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *Estratégia TC* e com a *Estratégia TC_Janela*.

Tabela 4.15 - Redução do tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Mai 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2017-05	TC	27	002h 35min 10s	003h 04min 02s	9301	344,481
PMO-2017-05	TC_Janela	25	002h 10min 19s	002h 39min 13s	7819	312,760
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=5	23	001h 15min 37s	001h 44min 35s	4537	197,261
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=10	26	001h 53min 00s	002h 23min 43s	6780	260,769
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=20	25	001h 22min 26s	001h 50min 25s	4946	197,840
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=45	25	001h 24min 30s	001h 52min 44s	5070	202,800
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=5	23	001h 18min 12s	001h 46min 46s	4692	204,000
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=10	26	001h 30min 40s	001h 59min 33s	5440	209,231
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=20	25	001h 23min 18s	001h 52min 18s	4998	199,920
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=45	25	001h 24min 39s	001h 52min 49s	5079	203,160
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=5	23	001h 08min 20s	001h 36min 17s	4100	178,261
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=10	26	001h 35min 57s	002h 05min 37s	5757	221,423
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=20	25	001h 26min 33s	001h 55min 09s	5193	207,720
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=45	25	001h 22min 52s	001h 51min 12s	4972	198,880

Neste PMO, a maior redução no tempo computacional médio por iteração da PDDE foi obtida para os parâmetros $nadic=15$ e $k_2=5$ e na ordem de **48%** quando comparada à *Estratégia TC* e na ordem de **43%** quando comparada à *Estratégia TC_Janela*.

A Tabela 4.16 mostra uma comparação entre os tempos totais de execução do PDE 2024 e também entre os tempos para cálculo da política de operação com a *Estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *Estratégia TC* e com a *Estratégia TC_Janela*.

Tabela 4.16 - Redução do tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela – PDE 2024

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PDE2024	TC	28	007h 48min 10s	009h 39min 12s	28090	1003,214
PDE2024	TC_Janela	28	007h 13min 51s	009h 00min 07s	26031	929,679
PDE2024	SC_nadic=5-k2=5	36	007h 11min 20s	009h 06min 12s	25880	718,889
PDE2024	SC_nadic=5-k2=10	25	004h 06min 06s	005h 50min 17s	14766	590,640
PDE2024	SC_nadic=10-k2=5	22	002h 51min 34s	004h 31min 53s	10294	467,909
PDE2024	SC_nadic=10-k2=10	33	006h 03min 47s	007h 55min 50s	21827	661,424
PDE2024	SC_nadic=10-k2=20	29	005h 23min 16s	007h 09min 48s	19396	668,828
PDE2024	SC_nadic=10-k2=45	38	008h 31min 05s	010h 27min 52s	30665	806,974
PDE2024	SC_nadic=15-k2=10	33	006h 25min 15s	008h 15min 29s	23115	700,455

Observa-se que a maior redução no tempo computacional médio por iteração da PDDE foi obtida para os parâmetros $nadic=10$ e $k_2=5$ e na ordem de **53%** quando comparada à *estratégia TC* e na ordem de **50%** quando comparada à *estratégia TC_Janela*.

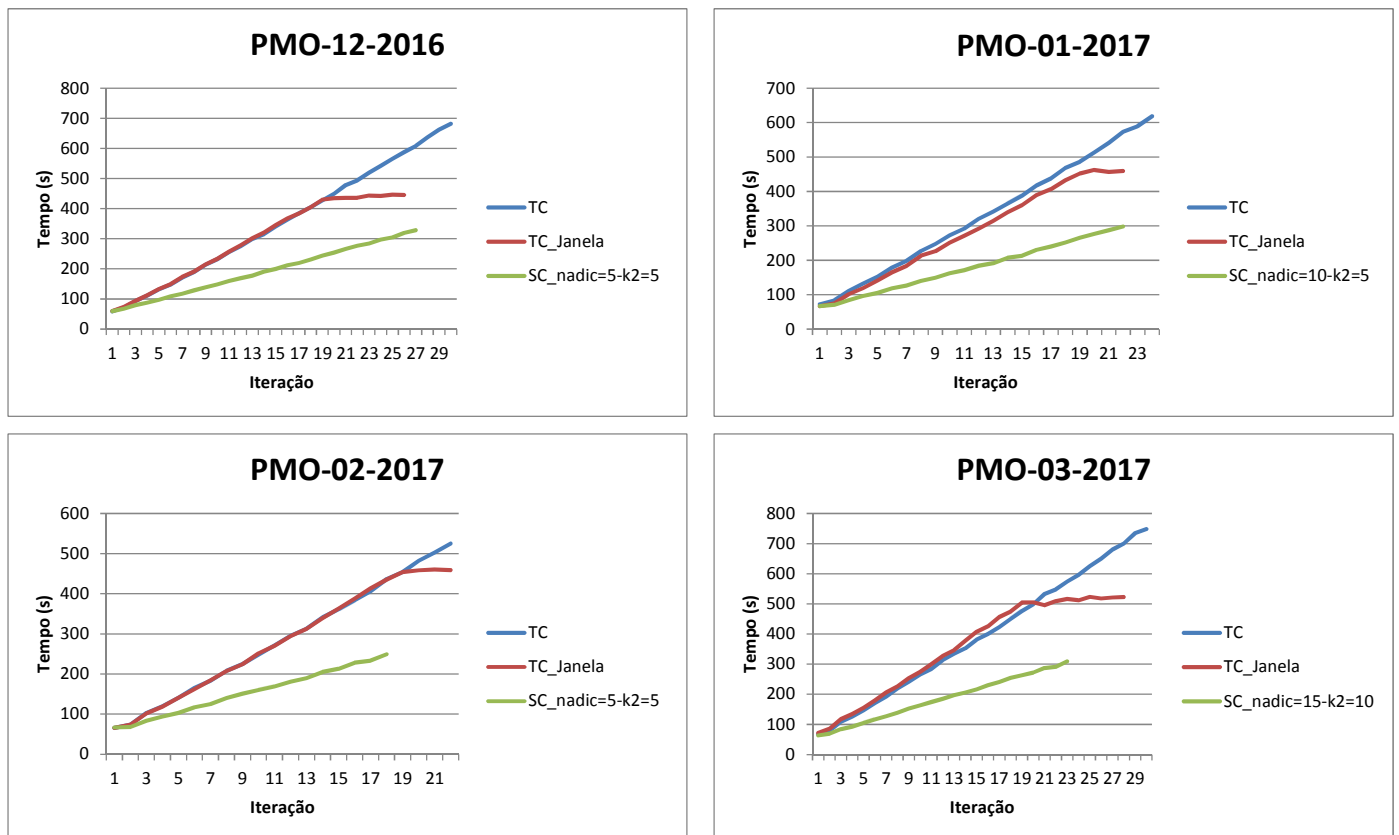
A Tabela 4.17 ilustra as maiores reduções de tempo computacional para o cálculo da política e execução do modelo NEWAVE das estratégias SC, TC e TC_Janela para os PMOs Dez 2016 a Mai 2017 e PDE 2024.

Tabela 4.17 – Resumo das reduções de tempo computacional obtidos para os PMOs Dez 2016 a Jan 2017 e PDE 2024

CASO	PARÂMETROS	Redução Tempo Ite TC (%)	Redução Tempo Ite TC_Janela (%)
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=5	46,44	34,62
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=5	46,52	36,30
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=5	46,15	44,59
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=10	53,66	48,15
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=5	37,09	36,93
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=5	48,25	43,00
PDE2024	SC_nadic=10-k2=5	53,36	49,67

Não se identifica um comportamento persistente de acréscimo ou decréscimo de tempo computacional em relação ao parâmetro *nadic*, o que significa que a determinação do seu valor, acima de 5, pouco afeta o desempenho do método. Já em relação ao parâmetro k_2 , verifica-se que o valor 5 é o que mais contribuiu para a redução do tempo computacional.

A Figura 4.1 ilustra a evolução do tempo computacional do cálculo da política de operação por iteração das estratégias *TC*, *TC_Janela* e a *SC* que apresentou menor tempo computacional, para todos os PMOs analisados e PDE 2024.



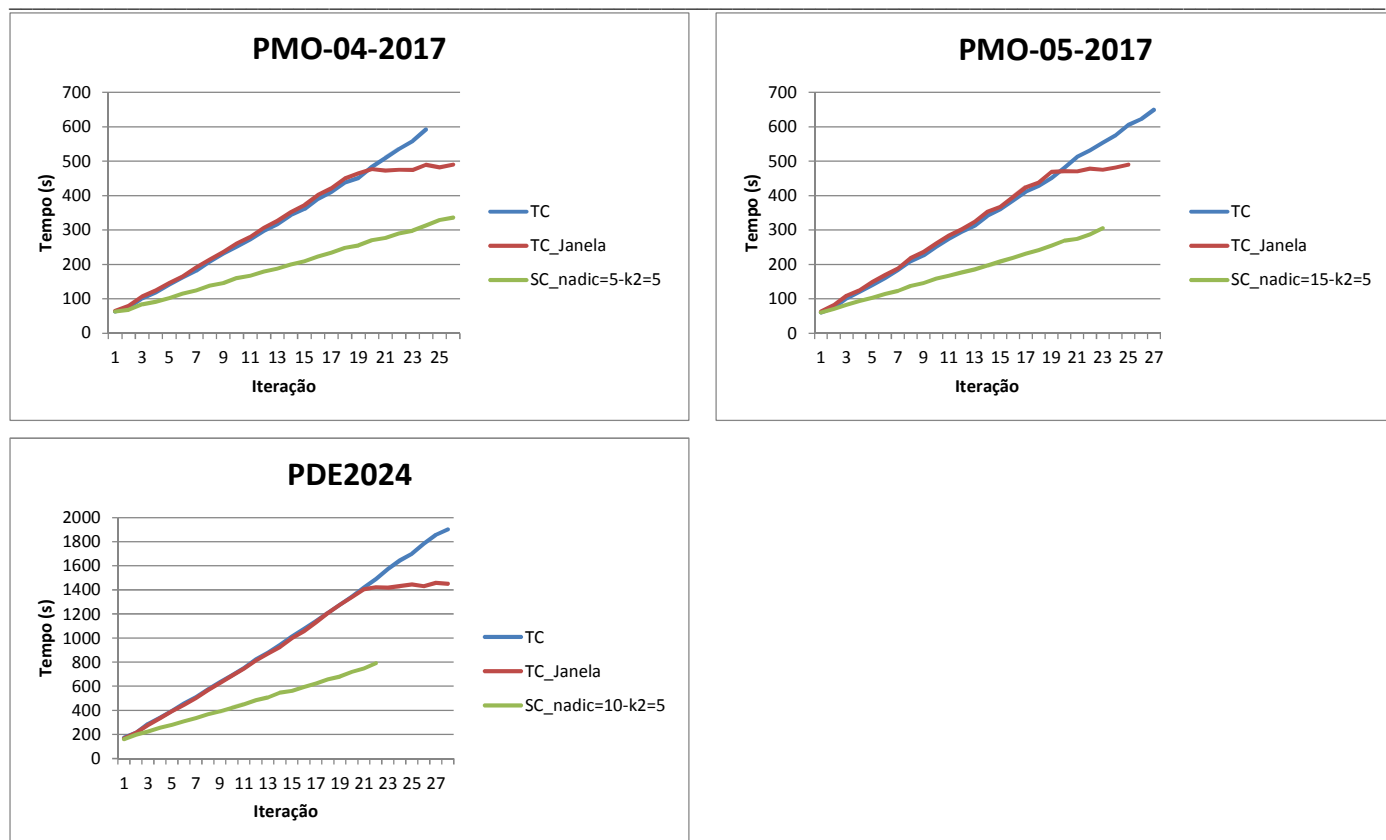


Figura 4.1 - Evolução do tempo computacional por iteração para as estratégias TC, TC_Janela e SC

4.3.3 Comentários

Algumas características da implementação computacional da estratégia SC no problema de planejamento real do modelo NEWAVE diferem de experiências anteriores dessa estratégia, reportadas em [19], [20]:

- 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 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 ao se aplicar a estratégia SC;

- 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, embora sejam largamente compensadas quando comparadas com a execução em serial, 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;
- Finalmente, a própria estratégia de SC envolve uma maior comunicação entre os processadores, em relação à estratégia TC, quando executada em ambiente de processamento paralelo com um número grande de processadores, o que não foi considerado nos demais trabalhos.

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, já obtidos em experiências anteriores do CEPEL com o uso de estratégias iterativas similares, como por exemplo, na modelagem da função de produção dinâmica [13].

4.4 Análise de consistência: estratégia SC X estratégia TC

Os resultados de convergência do NEWAVE tenderão a ser diferentes quando comparamos as estratégias TC e SC. Isto ocorre porque, embora o valor ótimo do PL seja o mesmo em ambas as estratégias de resolução do PL, os resultados das variáveis e multiplicadores das restrições poderão ser diferentes, devido à existência de mais de uma solução ótima, considerando-se o critério de otimalidade e a precisão computacional do *solver* de programação linear. Desta forma, pequenas diferenças ocorridas em alguns PLs no início do processo iterativo da PDDE podem se propagar, resultando em diferenças nos valores de limites inferior e superior ao longo do processo de convergência.

4.4.1 Valor ótimo na resolução dos PLs:

De forma a assegurar que o método de SC resolva corretamente os PLs, compararam-se os valores ótimos de todos os PLs do caso de Abril/2017, que haviam sido analisados na seção 4.3.1 em relação ao tempo computacional. Os resultados são mostrados na Tabela 4.18, onde se verifica que os valores ótimos são os mesmos em todos os PLs, a menos de diferenças muito pequenas de precisão.

Tabela 4.18 – Comparação entre os valores ótimos dos PLs entre as estratégias SC e TC, para algumas séries, aberturas, períodos e iterações da PDDE.

iter	período	série	abertura	Dif Valor Ótimo p04-s001	Dif Valor Ótimo p04-s050	Dif Valor Ótimo p04-s075	Dif Valor Ótimo p04-s100	Dif Valor Ótimo p04-s125	Dif Valor Ótimo p04-s150	Dif Valor Ótimo p04-s175	Di
2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	9	0	0	0	0	9.98378E-07	0	0	0
2	4	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	13	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	15	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	16	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	17	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	18	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	19	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	1	3	0	0	0	0	0	0	-9.98378E-07	0
3	4	1	4	0	0	0	0	0	0	-9.98378E-07	0

4.4.2 Processo de convergência do NEWAVE

Apesar do processo de convergência da PDDE ser diferente entre os métodos TC e SC, conforme discutido na seção 3.5.1, estes devem apresentar comportamentos semelhantes, principalmente em relação aos valores finais obtidos para os limites inferior e superior de convergência. Estes resultados são analisados a seguir.

A Tabela 4.19 mostra os valores de ZINF e ZSUP da última iteração e também do custo total de operação da simulação final com 2.000 cenários de afluições aos REEs (COPER) do PMO Dez 2016 com a *estratégia SC* com diferentes parametrizações, com a *estratégia TC* e com a *estratégia TC_Janela*.

Tabela 4.19 – Valores de ZINF, ZSUP (última Iteração) e Custo Esperado de Operação da Sim. Final do modelo NEWAVE com as estratégias SC, TC e TC_Janela - PMO Dez 2016

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	ZINF	ZSUP	COPER	D. PADRÃO
PMO-2016-12	TC	30	53.821,66	28.094,44	21.554,79	514,82
PMO-2016-12	TC_Janela	26	53.548,16	28.207,89	21.753,25	520,74
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=5	27	53.904,70	28.121,90	21.559,92	513,78
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=10	30	54.079,65	28.124,82	21.714,94	512,45
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=20	28	53.954,28	28.145,31	21.630,06	510,40
PMO-2016-12	SC_nadic=5-k2=45	30	54.063,61	28.205,51	21.541,28	503,38
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=5	27	53.901,50	28.147,40	21.500,80	510,71
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=10	30	54.077,40	28.192,12	21.594,58	498,23
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=20	28	53.954,28	28.145,31	21.630,06	510,40
PMO-2016-12	SC_nadic=10-k2=45	30	54.063,61	28.205,51	21.541,28	503,38
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=5	27	53.896,31	28.119,05	21.555,43	507,09
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=10	30	54.077,40	28.192,12	21.594,58	498,23
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=20	28	53.954,28	28.145,31	21.630,06	510,40
PMO-2016-12	SC_nadic=15-k2=45	30	54.063,61	28.205,51	21.541,28	503,38

Observa-se que para todos os casos todas as estatísticas ZINF, ZSUP e COPER são muito próximas.

A seguir, mostram-se, da Tabela 4.20 à Tabela 4.25, estes mesmos resultados para os PMOs de Jan 2017, Fev 2017, Mar 2017, Abr 2017 e Mai 2017 e PDE 2024 respectivamente. Como esperado, todos os resultados são próximos entre si.

Tabela 4.20 - Valores de ZINF, ZSUP (última Iteração) e Custo Esperado de Operação da Sim. Final do modelo NEWAVE com as estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Jan 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	ZINF	ZSUP	COPER	D. PADRÃO
PMO-2017-01	TC	24	42.434,82	25.862,03	20.574,09	392,34
PMO-2017-01	TC_Janela	22	42.318,50	25.737,44	20.463,01	371,00
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=5	28	42.654,14	25.708,05	20.596,23	383,69
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=10	26	42.557,97	25.775,00	20.442,07	368,54
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=20	26	42.575,06	25.894,83	20.562,18	371,00
PMO-2017-01	SC_nadic=5-k2=45	26	42.575,66	25.944,69	20.537,06	368,99
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=5	22	42.272,03	25.805,49	20.615,86	373,35
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=10	24	42.404,10	25.777,68	20.619,39	387,38
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=20	28	42.603,05	25.878,90	20.367,37	356,66
PMO-2017-01	SC_nadic=10-k2=45	25	42.438,92	25.925,75	20.580,15	376,40
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=5	22	42.272,03	25.805,49	20.615,86	373,35
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=10	24	42.404,10	25.777,68	20.619,39	387,38
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=20	28	42.603,05	25.878,90	20.367,37	356,66
PMO-2017-01	SC_nadic=15-k2=45	25	42.438,92	25.925,75	20.580,15	376,40

Tabela 4.21 – Valores de ZINF, ZSUP (última Iteração) e Custo Esperado de Operação da Sim. Final do modelo NEWAVE com as estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Fev 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	ZINF	ZSUP	COPER	D. PADRÃO
PMO-2017-02	TC	22	50.674,63	30.020,40	24.450,63	459,58
PMO-2017-02	TC_Janela	22	50.653,69	29.993,76	24.414,76	464,91
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=5	18	50.515,93	30.141,64	24.593,96	457,93
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=10	22	50.810,07	29.844,28	24.374,49	455,13
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=20	22	50.857,28	30.026,16	24.453,92	459,59
PMO-2017-02	SC_nadic=5-k2=45	22	50.857,28	30.026,16	24.453,92	459,59
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=5	18	50.532,69	30.113,84	24.420,10	459,37
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=10	22	50.803,49	29.811,31	24.332,11	456,63
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=20	22	50.857,28	30.026,16	24.453,92	459,59
PMO-2017-02	SC_nadic=10-k2=45	22	50.857,28	30.026,16	24.453,92	459,59
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=5	18	50.532,69	30.113,83	24.420,10	459,37
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=10	22	50.803,49	29.811,31	24.332,11	456,63
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=20	22	50.857,28	30.026,16	24.453,92	459,59
PMO-2017-02	SC_nadic=15-k2=45	22	50.857,28	30.026,16	24.453,92	459,59

Tabela 4.22 – Valores de ZINF, ZSUP (última Iteração) e Custo Esperado de Operação da Sim. Final do modelo NEWAVE com as estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Mar 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	ZINF	ZSUP	COPER	D. PADRÃO
PMO-2017-03	TC	30	47.412,71	28.461,51	22.792,70	392,95
PMO-2017-03	TC_Janela	28	47.277,18	28.423,77	23.252,83	409,53
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=5	24	46.918,04	28.422,36	22.761,72	396,64
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=10	23	46.790,53	28.423,55	22.759,24	390,95
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=20	31	47.310,86	28.272,17	22.771,17	399,23
PMO-2017-03	SC_nadic=5-k2=45	27	47.128,53	28.344,16	22.756,56	391,21
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=5	24	46.918,04	28.422,36	22.761,72	396,64
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=10	23	46.790,53	28.423,55	22.759,24	390,95
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=20	25	46.953,45	28.406,85	22.867,09	404,71
PMO-2017-03	SC_nadic=10-k2=45	31	47.352,82	28.296,53	22.876,62	397,73
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=5	24	46.918,04	28.422,36	22.761,72	396,64
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=10	23	46.790,53	28.423,55	22.759,24	390,95
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=20	25	46.953,45	28.406,85	22.867,09	404,71
PMO-2017-03	SC_nadic=15-k2=45	31	47.352,82	28.296,53	22.876,62	397,73

Tabela 4.23 – Valores de ZINF, ZSUP (última Iteração) e Custo Esperado de Operação da Sim. Final do modelo NEWAVE com as estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Abr 2017

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	ZINF	ZSUP	COPER	D. PADRÃO
PMO-2017-04	TC	24	52.389,26	31.407,95	25.950,20	475,94
PMO-2017-04	TC_Janela	26	52.562,08	31.406,93	25.851,41	466,09
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=5	26	52.419,43	31.367,95	25.901,81	476,33
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=10	29	52.596,68	31.316,66	26.033,87	477,65
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=20	26	52.448,76	31.373,45	25.916,94	474,31
PMO-2017-04	SC_nadic=5-k2=45	26	52.447,83	31.379,21	25.936,94	477,88
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=5	26	52.419,43	31.367,95	25.901,81	476,33
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=10	29	52.596,68	31.316,66	26.033,87	477,65
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=20	26	52.448,76	31.373,45	25.916,94	474,31
PMO-2017-04	SC_nadic=10-k2=45	26	52.447,83	31.379,21	25.936,94	477,88
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=5	26	52.419,43	31.367,95	25.901,81	476,33
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=10	29	52.596,68	31.316,66	26.033,87	477,65
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=20	26	52.448,76	31.373,45	25.916,94	474,31
PMO-2017-04	SC_nadic=15-k2=45	26	52.447,83	31.379,21	25.936,94	477,88

Tabela 4.24 – Valores de ZINF, ZSUP (última Iteração) e Custo Esperado de Operação da Sim. Final do modelo NEWAVE com as estratégias SC, TC e TC_Janela – PMO Mai 2017

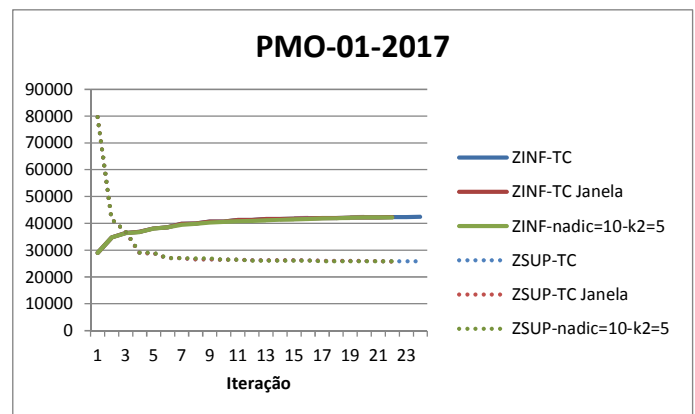
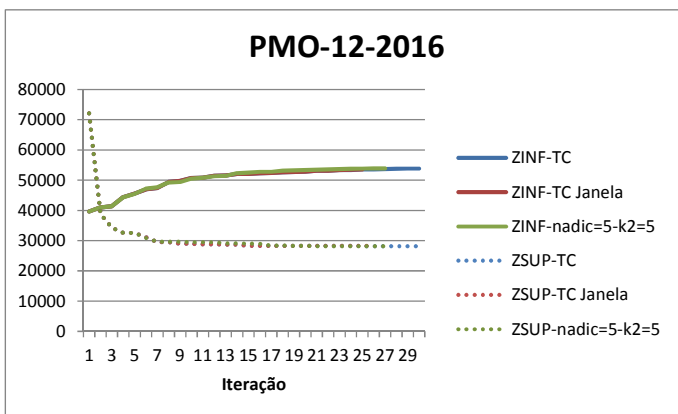
CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	ZINF	ZSUP	COPER	D. PADRÃO
PMO-2017-05	TC	27	105.956,81	42.058,53	33.067,30	489,96
PMO-2017-05	TC_Janela	25	105.657,31	42.108,87	33.009,46	489,41
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=5	23	105.155,39	42.175,32	32.983,37	491,62
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=10	26	105.603,01	42.164,99	32.923,78	495,29
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=20	25	105.473,42	42.215,60	32.929,74	482,37
PMO-2017-05	SC_nadic=5-k2=45	25	105.482,79	42.173,59	32.915,97	483,85
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=5	23	105.183,09	42.260,39	33.111,93	486,93
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=10	26	105.603,01	42.164,99	32.923,78	495,29
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=20	25	105.473,42	42.215,60	32.929,74	482,37
PMO-2017-05	SC_nadic=10-k2=45	25	105.482,79	42.173,59	32.915,97	483,85
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=5	23	105.183,09	42.260,39	33.111,93	486,93
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=10	26	105.603,01	42.164,99	32.923,78	495,29
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=20	25	105.473,42	42.215,60	32.929,74	482,37
PMO-2017-05	SC_nadic=15-k2=45	25	105.482,79	42.173,59	32.915,97	483,85

Tabela 4.25 – Valores de ZINF, ZSUP (última Iteração) e Custo Esperado de Operação da Sim. Final do modelo NEWAVE com as estratégias SC, TC e TC_Janela – PDE 2024

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	ZINF	ZSUP	COPER	D. PADRÃO
PDE2024	TC	28	171.819,52	92.674,51	90.898,03	1.033,85
PDE2024	TC_Janela	28	171.723,94	92.867,40	90.933,67	1.029,29
PDE2024	SC_nadic=5-k2=5	36	172.444,59	92.874,49	90.117,80	1.020,31
PDE2024	SC_nadic=5-k2=10	25	169.232,80	93.190,84	91.299,17	1.042,22
PDE2024	SC_nadic=10-k2=5	22	168.056,01	92.938,25	90.201,18	1.038,03
PDE2024	SC_nadic=10-k2=10	33	171.938,14	92.973,93	90.889,56	1.033,58
PDE2024	SC_nadic=10-k2=20	29	170.692,10	93.009,94	90.144,21	1.031,68
PDE2024	SC_nadic=10-k2=45	38	172.912,48	92.223,36	90.056,85	1.025,53
PDE2024	SC_nadic=15-k2=10	33	171.938,14	92.973,93	90.889,56	1.033,58

Uma variante do conjunto inicial para seleção de cortes de Benders é considerar apenas o conjunto de cortes ativos nas k_2 ultimas iterações. O Anexo I apresenta as tabelas 4.19, 4.22 e 4.24 incluindo os resultados obtidos com esta variante nos PMOs de Dezembro de 2016, Março de 2017 e Maio de 2017 respectivamente.

A Figura 4.2 ilustra a evolução da convergência do cálculo da política de operação (valores de ZINF e ZSUP) por iteração das estratégias TC, TC_Janela e a SC que apresentou menor tempo computacional, para todos os PMOs e PDE.



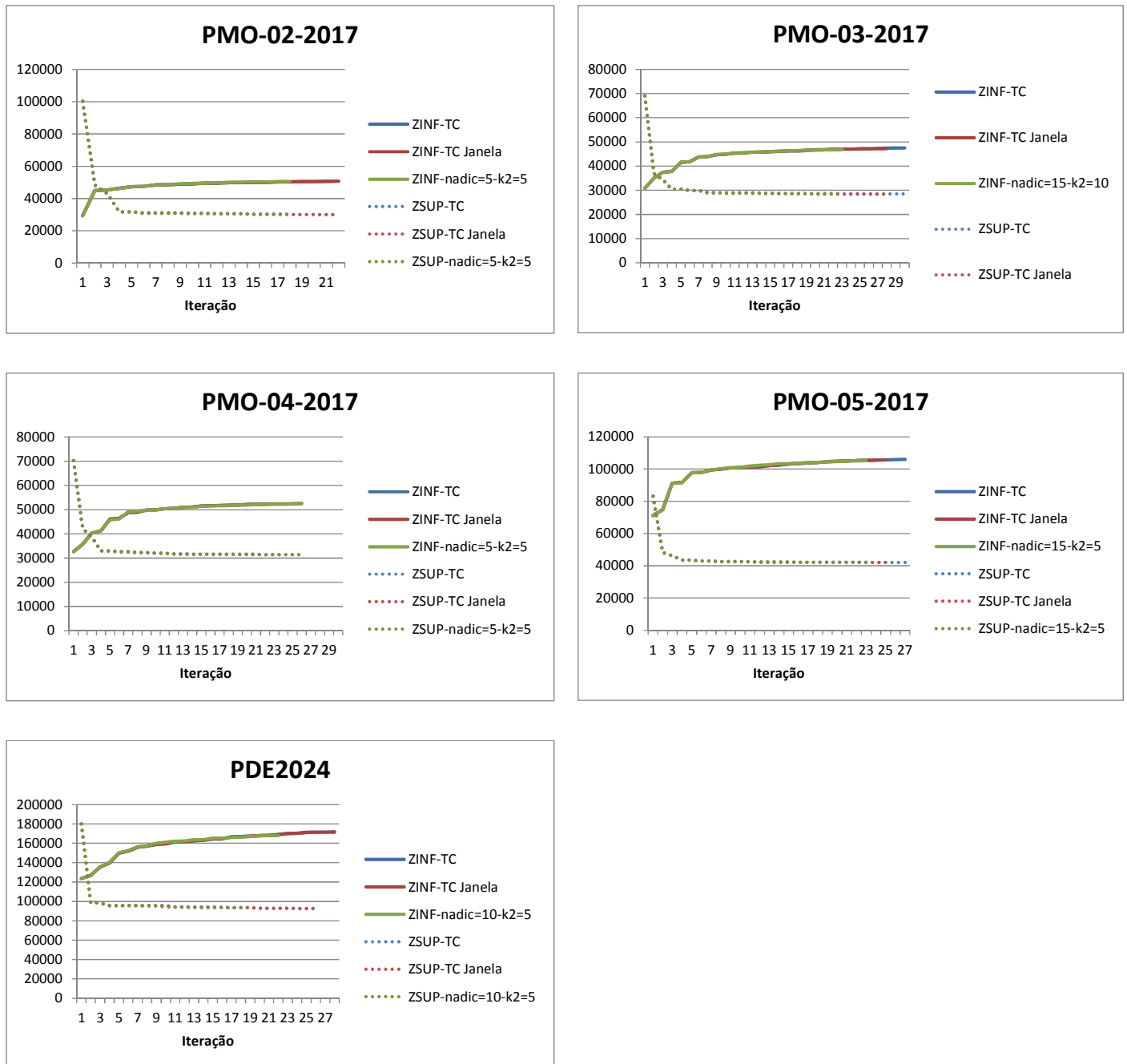


Figura 4.2 - Evolução da convergência do cálculo da política de operação por iteração para as estratégias TC, TC_Janela e SC

4.5 Análise de resultados: estratégias SC x estratégia TC

Finalmente, apresenta-se uma análise estatística dos resultados obtidos para algumas variáveis de interesse nos resultados do modelo NEWAVE. Serão mostrados testes de comparação dos resultados entre as estratégias TC, TC_Janela e a variante de SC que apresentou menor tempo computacional, para o PMO Dez 2016, em relação às seguintes variáveis: EARM, GHIDR, GTER, CMO. Os demais

PMOs e PDE apresentaram comportamentos muito semelhantes e os resultados encontram-se no Anexo II.

A Figura 4.3 ilustra a evolução do valor esperado dos custos marginais de operação ao longo do período de planejamento para os quatro subsistemas da configuração.

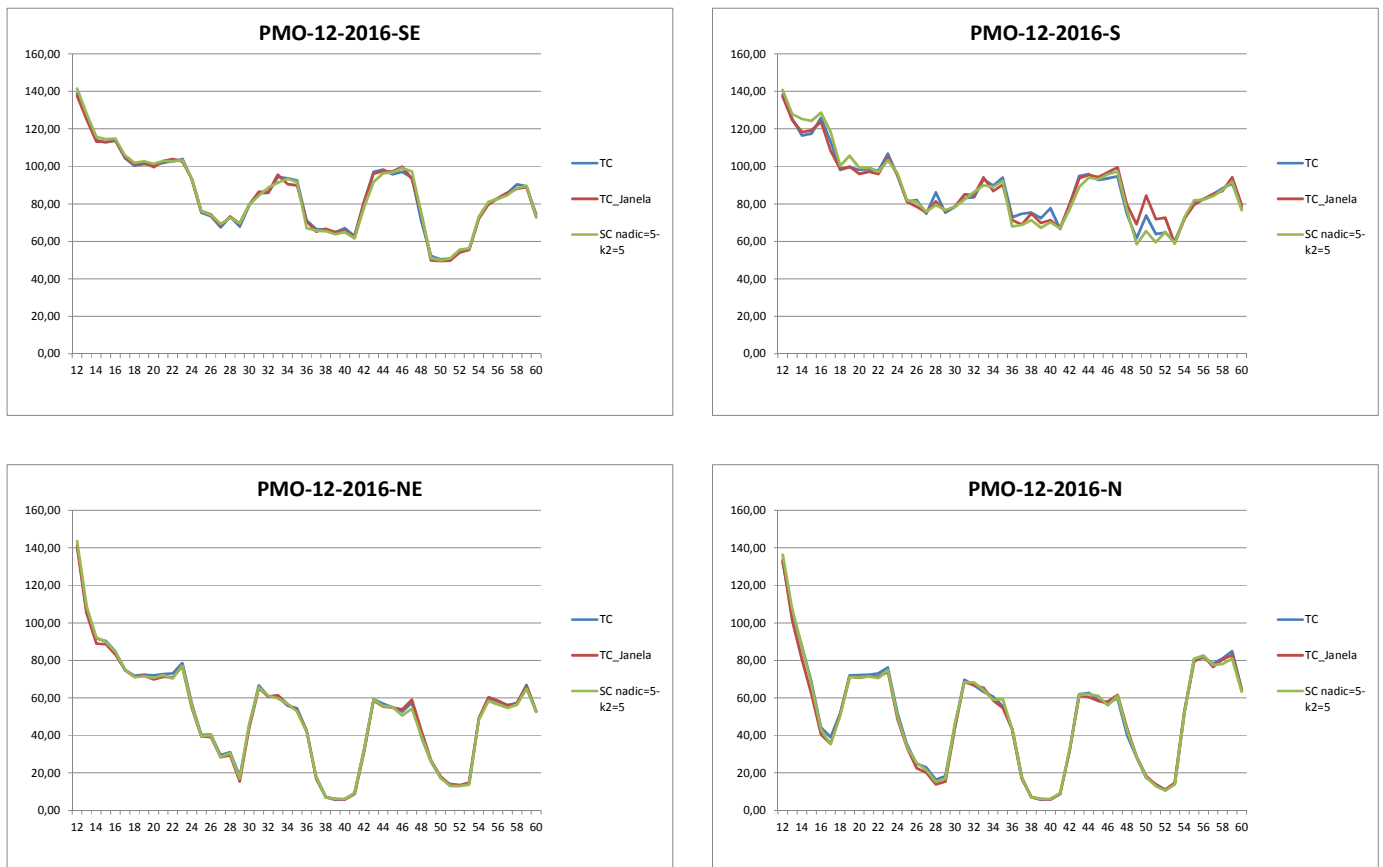


Figura 4.3 - Evolução dos CMOs médios ao longo do período de planejamento – PMO Dez 2016

Na Figura 4.4 observa-se a evolução do valor esperado da geração térmica média mensal ao longo do período de planejamento para os quatro subsistemas da configuração. As variáveis CMO e geração térmica média apresentaram comportamentos muito semelhantes nas estratégias *TC*, *TC_Janela* e *SC* de maior redução de tempo para cálculo da política de operação.

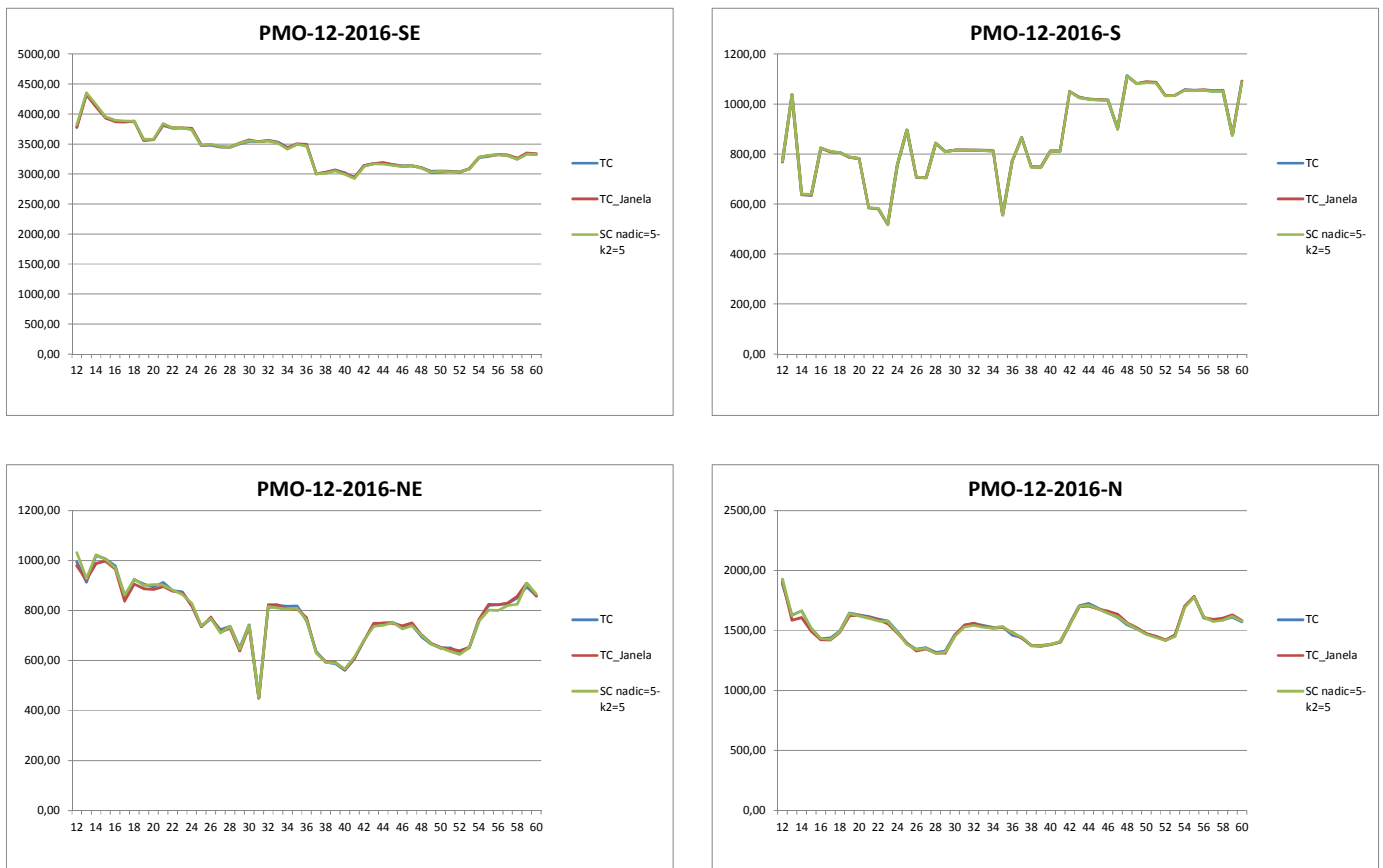
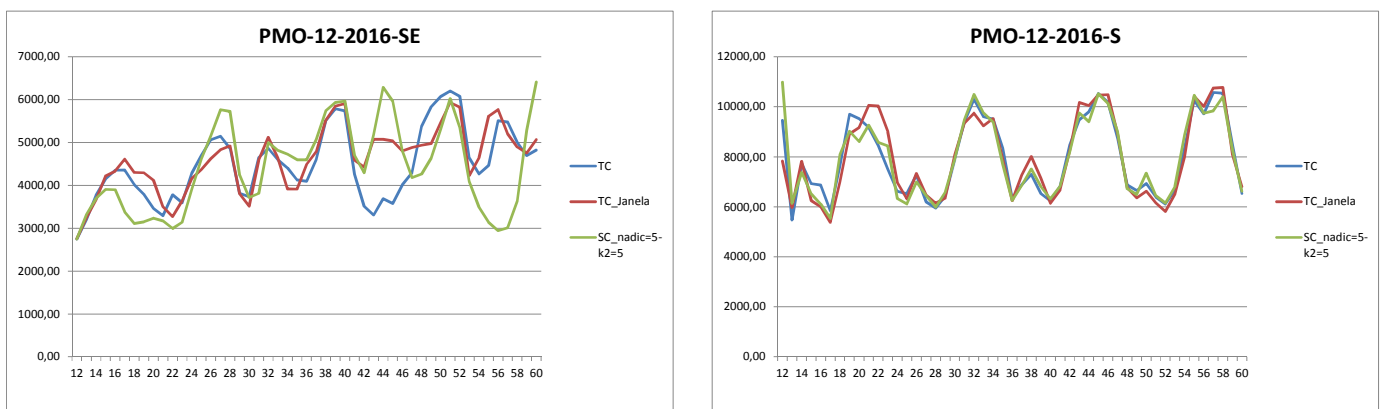


Figura 4.4 - Evolução da geração térmica média ao longo do período de planejamento – PMO Dez 2016

A Figura 4.5 ilustra a evolução do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, ao longo do período de planejamento para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



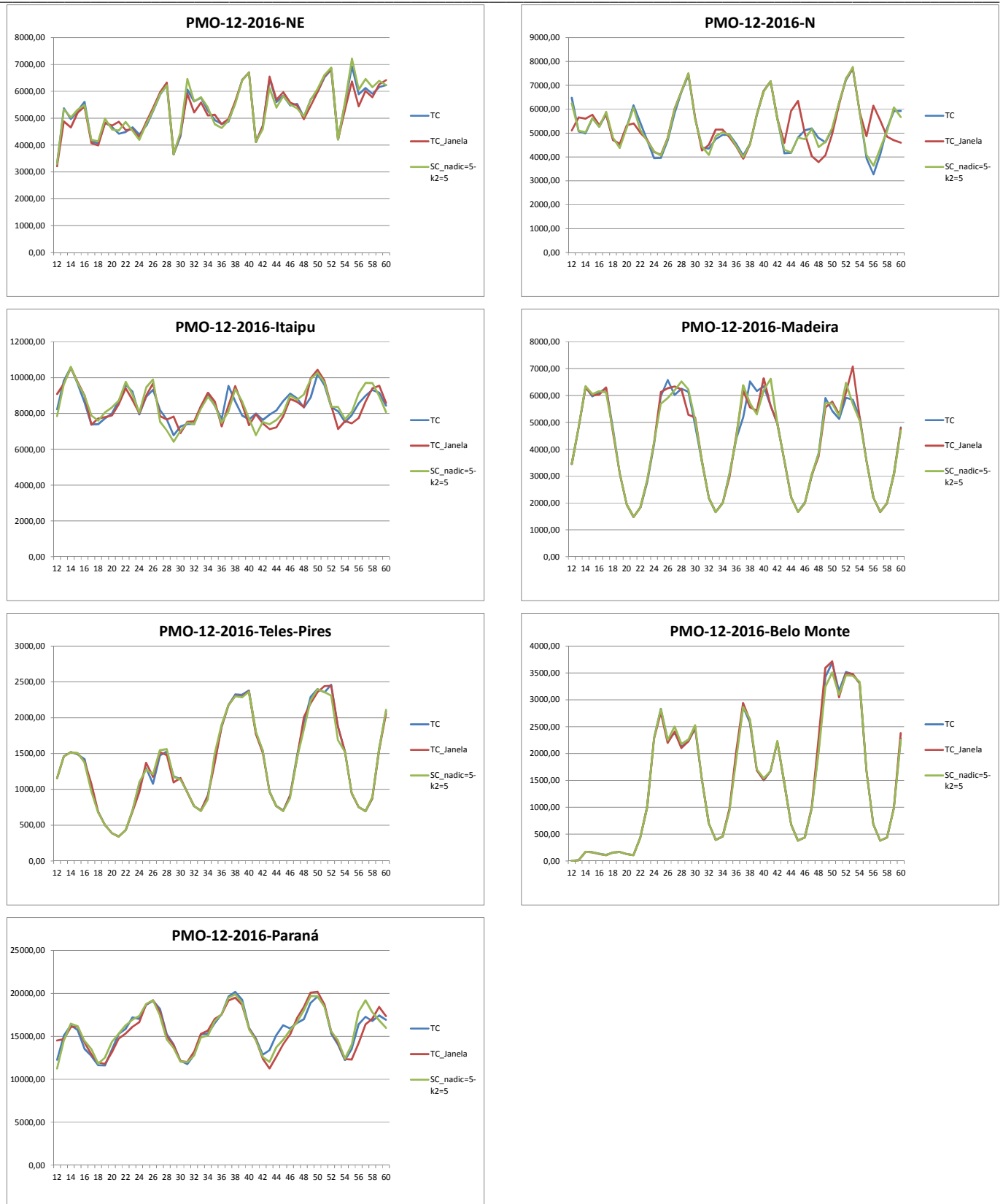
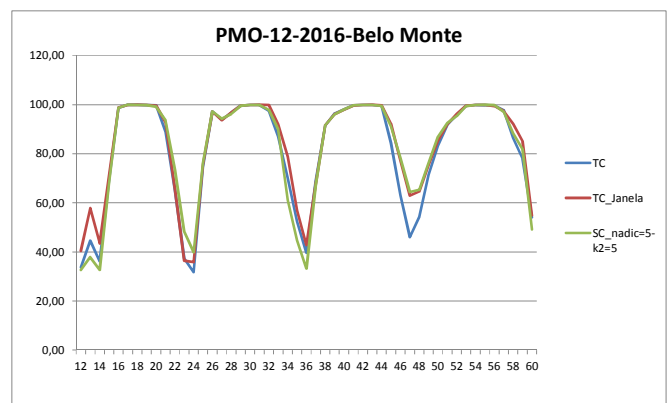
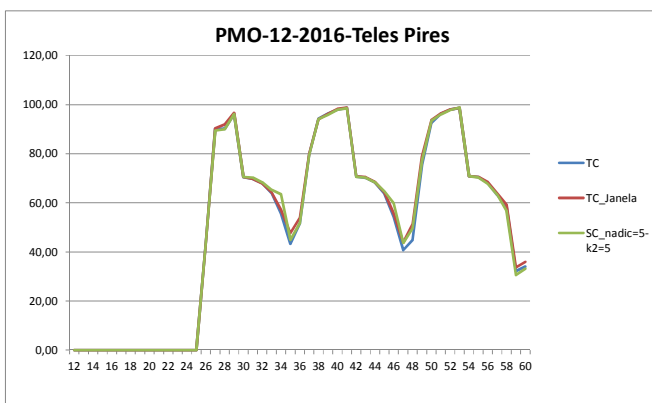
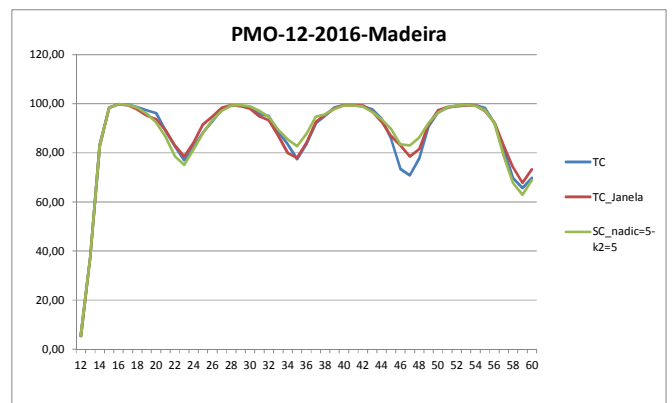
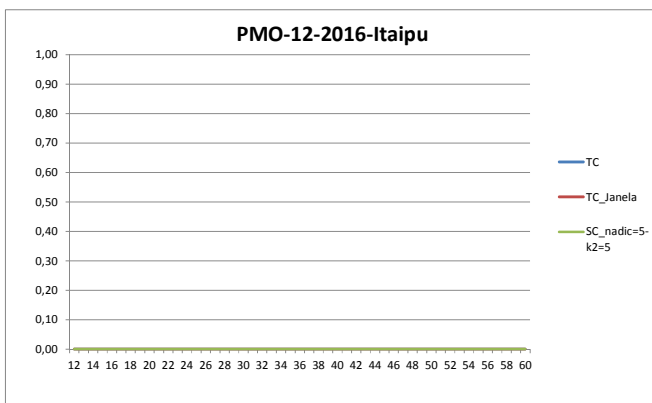
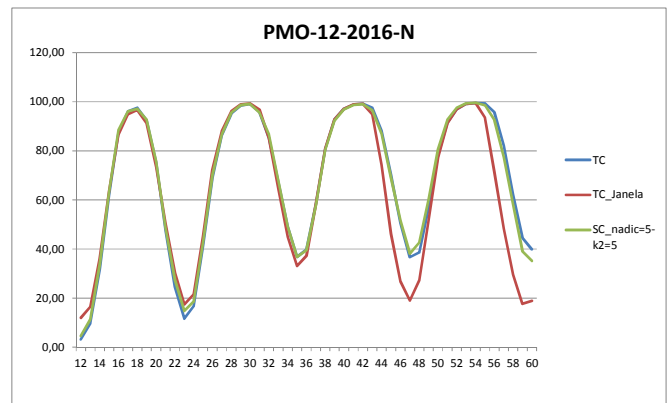
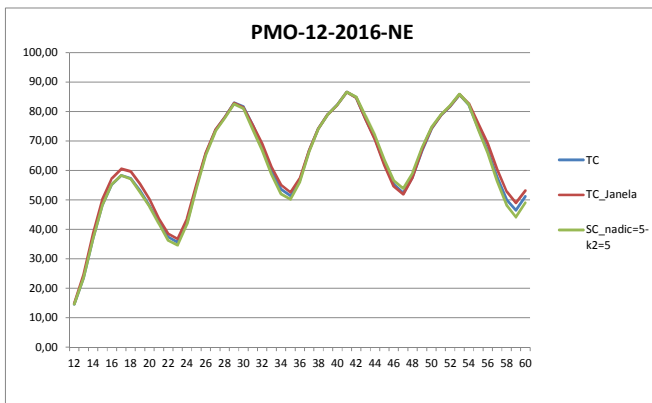
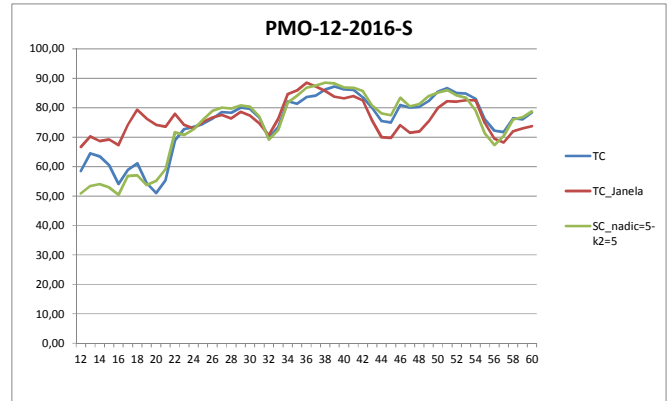
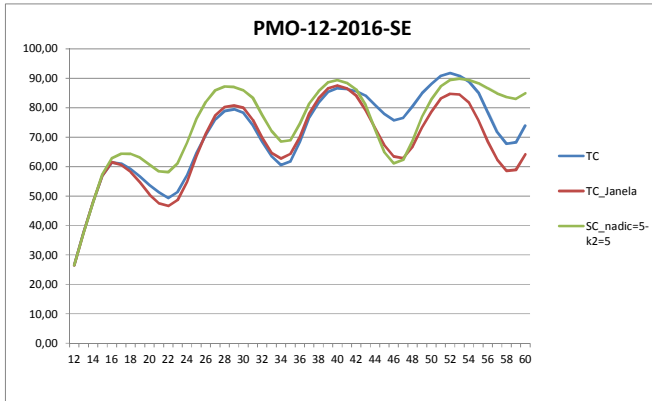


Figura 4.5 - Evolução da geração hidráulica média por REE ao longo do período de planejamento – PMO Dez 2016

A Figura 4.5 ilustra a evolução do valor esperado do armazenamento ao longo do período de planejamento para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



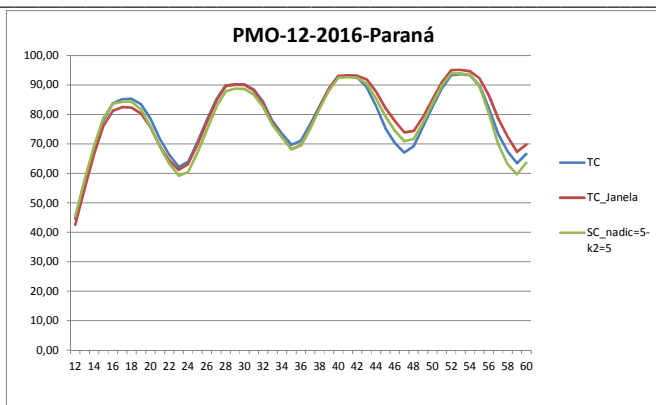


Figura 4.6 - Evolução do armazenamento médio (%) por REE ao longo do período de planejamento – PMO Dez 2016

Tanto da Figura 4.5 como da Figura 4.6, observa-se que as variáveis geração hidráulica total média e armazenamento médio por REE apresentam diferenças de comportamento entre as estratégias de solução. Porém, observando-se o comportamento destas variáveis para o SIN na Figura 4.7, temos que as trajetórias de armazenamento médio e geração hidráulica total média ao longo de todos os cenários são muito próximas. Isto ocorre porque, embora o valor ótimo do PL seja o mesmo em ambas as estratégias de resolução do PL, os resultados das variáveis e multiplicadores das restrições poderão ser diferentes, devido à existência de mais de uma solução ótima, considerando-se o critério de otimalidade e a precisão computacional do *solver* de programação linear.

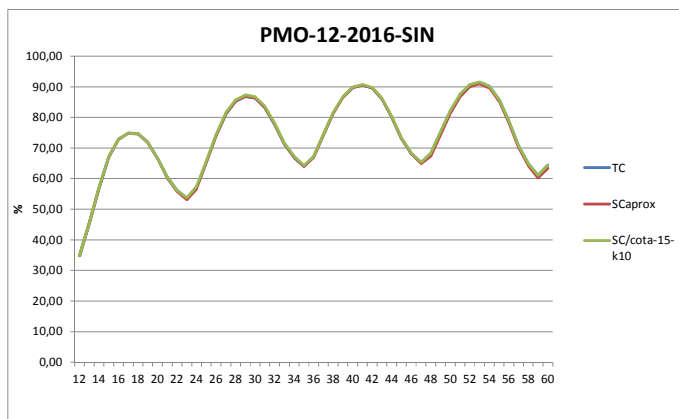
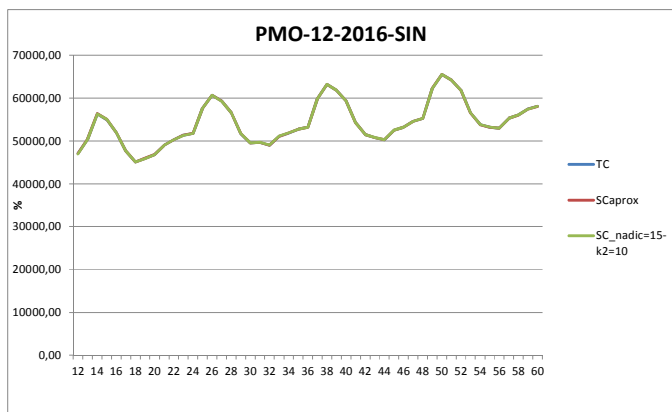


Figura 4.7 - Evolução da geração hidráulica total e do armazenamento médio do SIN ao longo do período de planejamento – PMO Dez 2016

5 Conclusões

Este relatório apresentou um método de seleção de cortes de Benders nos subproblemas de programação linear (PLs) resultantes da decomposição do problema de planejamento hidrotérmico estocástico de médio/longo prazos, resolvido segundo a metodologia de PDDE, de forma a diminuir o tempo computacional para resolução dos PLs, principalmente nas iterações mais avançadas da metodologia. O método consiste em resolver cada PL de forma iterativa, onde inicialmente inserem-se apenas os cortes de Benders que estiveram ativos em iterações anteriores da PDDE, e/ou que tenham sido construídos na mesma iteração *backward*. Em seguida, os cortes não incluídos são verificados em relação à sua "atividade" (valor do custo futuro, caso o corte fosse acessado), e os cortes que apresentarem valores superiores ao custo futuro obtido na resolução anterior do PL são adicionados de forma progressiva, respeitando critérios definidos a partir de alguns parâmetros.

Os resultados mostraram o potencial do método em relação à redução do tempo computacional para a resolução dos PLs e, conseqüentemente, no tempo total de convergência do NEWAVE, obtendo-se resultados equivalentes à alternativa de inserir todos os cortes no PL. Esta metodologia foi implementada na versão 23.1 do modelo NEWAVE e avaliada pelo grupo GT de metodologia da CPAMP, com o objetivo de orientar a escolha dos parâmetros para fins de uso oficial, a partir do ano de 2018.

Não se identificou um comportamento persistente de acréscimo ou decréscimo de tempo computacional em relação ao parâmetro *nadic*, número máximo de cortes a serem incluídos no PL por iteração, o que significa que a determinação do seu valor, acima de 5, pouco afeta o desempenho do método. Já em relação ao parâmetro k_2 , janela definida para verificação dos cortes ativos, verificou-se que o valor 5 é o que mais contribuiu para a redução do tempo computacional.

Finalmente, como desenvolvimentos futuros, pretende-se revisitar a estratégia de eliminação de cortes de Benders discutida na seção 2.2, que na época em que foi analisada pelo CEPEL não apresentou ganhos muito significativos. Acredita-se que a combinação entre as estratégias de eliminação de cortes e seleção de cortes possa trazer reduções ainda maiores no tempo computacional para se resolver o problema. Além disso, o processo de SC será realizado também na simulação *forward* da PDDE.

6 Agradecimentos

A elaboração deste Relatório contou com a contribuição dos bolsistas de mestrado Pedro Souza Simon e Renan Monteiro de Andrade e também dos estagiários Marcelo Frederico Zamboni, Miryam Gerk Curty e Camila Tais Rodrigues Cavalcanti.

7 REFERÊNCIAS

- [1] CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Manual do Usuário do modelo NEWAVE, versão 22, Dezembro de 2015.
- [2] M.E.P. Maceira, L.A. Terry, F.S. Costa, J.M. Damazio, A.C.G. Melo, "Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System", 14th PSCC – Power Systems Computation conference, Sevilla, Spain, 2002.
- [3] M.E.P. Maceira, V.S. Duarte, D.D.J. Penna, L.A.M. Moraes, A.C.G. Melo, "Ten years of application of stochastic dual dynamic Programming in official and agent studies in Brazil – Description of the NEWAVE program", 16th PSCC – Power Systems Computation conference, Glasgow, 2008.
- [4] D. D. J. Penna, M. E. P. Maceira, J.M. Damázio, "Selective sampling applied to long-term hydrothermal generation planning", 17th PSCC - Power Systems Computation Conference, Stockholm, Sweden, Ago. 2011.
- [5] M. E. P. Maceira, C. V. Bezerra, "Stochastic Streamflow model for Hydroelectric Systems", In: Proceedings of 5th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 305-310, Vancouver, Canada, Set. 1998.
- [6] M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto, "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning", Mathematical Programming, v. 52, n.1-3, pp. 359-375, Maio 1991
- [7] M.E.P. 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, Junho 1993.
- [8] A. B. Philpott, V. L. de Matos, "Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion", European Journal of Operational research, v. 218, n.2, pp. 470-483, 2012
- [9] A. L. Diniz, M. P. Tcheou, M. E. P. Maceira, "Uma abordagem direta para consideração do CVAR no problema de planejamento da operação hidrotérmica" XII SEPOPE - Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Maio de 2012.
- [10] A. Shapiro, W. Tekaya, J.P. Costa, M.P. Soares, "Risk neutral and risk averse Stochastic Dual Dynamic Programming method", European journal of operational research, v. 224, n.2, pp. 0375-0391, Jan. 2013
- [11] M.E.P. Maceira, L.G.B. Marzano, D.D.J. Penna, A.L. Diniz, T.C. Justino, "Application of CVaR risk aversion approach in the expansion and operation planning and for setting the spot price in the Brazilian hydrothermal interconnected system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v.72, pp. 126-135. Nov. 2015.
- [12] G. Infanger, D. P. Morton, "Cut sharing for multistage stochastic linear programs with interstage dependency", Mathematical Programming, v.75, n.2, pp. 241-256, 1996.
- [13] 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.

[14] T. N. Santos, A. L. Diniz, "A Comparison of Static and Dynamic Models for Hydro production in Generation Scheduling Problems", Proc. IEEE PES General Meeting, Minneapolis, USA, 2010.

[15] R. N. Cabral, M I. A. Ennes, A. L. Diniz, "Estratégia de PDDE linear por partes dinâmica aplicada a problemas de planejamento hidrotérmico estocástico", XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, Oct. 2013.

[16] B. Stott, J. L. Marinho, "Linear programming for power-system network security applications", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 98, n.3, pp. 837-848, 1979.

[17] A. L. Diniz, L. C. F. Sousa, M. E. P. Maceira, S. P. Romero, F. S. Costa, C. A. Sagastizabal, A. Belloni, "Estratégia de representação DC da rede elétrica no modelo de despacho da operação energética - DESSEM", VIII SEPOPE - Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Brasilia, Brazil, May 2002.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, "Tratamento de Cortes no modelo NEWAVE - Status de Andamento, Etapa 1: Eliminação de Cortes", Apresentação na 27ª Reunião da CPAMP, 15/07/2015.

8 ANEXO I

Conforme descrito no item 3.1, o conjunto de cortes de Benders iniciais para o processo de seleção são os cortes ativos nas k_2 últimas iterações anteriores e os cortes construídos no período $iper + 1$ e iteração corrente. A seguir são apresentados os resultados relativos a tempo computacional para execução do modelo NEWAVE sem a adição dos cortes construídos no período $iper + 1$ e iteração corrente no conjunto de cortes inicial.

A Tabela 8.1 corresponde à Tabela 4.19, referente ao PMO de Dezembro de 2016, adicionando-se os resultados desta variante.

Tabela 8.1 – Comparação de tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE considerando os cortes laterais e não considerando os cortes laterais – PMO-2016-12

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2016-12	TC	30	002h 58min 26s	003h 26min 28s	10706	356.87
PMO-2016-12	TC Janela	26	002h 06min 41s	002h 34min 11s	7601	292.35
PMO-2016-12	nadic=5-k2=5	27	001h 26min 01s	001h 54min 05s	5161	191.15
PMO-2016-12	nadic=5-k2=5-SemCorteLateral	26	001h 20min 38s	001h 47min 45s	4838	186.08
PMO-2016-12	nadic=5-k2=10	30	001h 50min 03s	002h 18min 40s	6603	220.10
PMO-2016-12	nadic=5-k2=10-SemCorteLateral	29	001h 42min 57s	002h 10min 14s	6177	213.00
PMO-2016-12	nadic=5-k2=20	28	001h 37min 23s	002h 05min 11s	5843	208.68
PMO-2016-12	nadic=5-k2=20-SemCorteLateral	24	001h 13min 24s	001h 39min 29s	4404	183.50
PMO-2016-12	nadic=5-k2=45	30	001h 48min 49s	002h 19min 07s	6529	217.63
PMO-2016-12	nadic=5-k2=45-SemCorteLateral	24	001h 13min 33s	001h 39min 33s	4413	183.88
PMO-2016-12	nadic=10-k2=5	27	001h 53min 04s	002h 22min 23s	6784	251.26
PMO-2016-12	nadic=10-k2=5-SemCorteLateral	26	001h 19min 06s	001h 44min 48s	4746	182.54
PMO-2016-12	nadic=10-k2=10	30	001h 45min 46s	002h 15min 22s	6346	211.53
PMO-2016-12	nadic=10-k2=10-SemCorteLateral	30	001h 48min 22s	002h 14min 53s	6502	216.73
PMO-2016-12	nadic=10-k2=20	28	001h 38min 59s	002h 06min 55s	5939	212.11
PMO-2016-12	nadic=10-k2=20-SemCorteLateral	30	001h 50min 37s	002h 17min 41s	6637	221.23
PMO-2016-12	nadic=10-k2=45	30	001h 59min 57s	002h 29min 01s	7197	239.90
PMO-2016-12	nadic=10-k2=45-SemCorteLateral	28	001h 36min 07s	002h 02min 10s	5767	205.96
PMO-2016-12	nadic=15-k2=5	27	001h 34min 11s	002h 02min 26s	5651	209.30
PMO-2016-12	nadic=15-k2=5-SemCorteLateral	29	001h 50min 48s	002h 19min 30s	6648	229.24
PMO-2016-12	nadic=15-k2=10	30	001h 48min 39s	002h 17min 04s	6519	217.30
PMO-2016-12	nadic=15-k2=10-SemCorteLateral	25	001h 17min 01s	001h 42min 27s	4621	184.84
PMO-2016-12	nadic=15-k2=20	28	001h 42min 38s	002h 10min 59s	6158	219.93
PMO-2016-12	nadic=15-k2=20-SemCorteLateral	28	001h 35min 33s	002h 01min 30s	5733	204.75
PMO-2016-12	nadic=15-k2=45	30	001h 51min 03s	002h 20min 04s	6663	222.10
PMO-2016-12	nadic=15-k2=45-SemCorteLateral	28	001h 37min 19s	002h 03min 21s	5839	208.54

Observa-se que o caso com menor tempo computacional foi o caso SC_nadic=5 e K2=20, sem considerar os cortes laterais.

A Tabela 8.2 corresponde à Tabela 4.22, referente ao PMO de Março de 2017, adicionando-se os resultados sem considerar os cortes construídos no período $iper + 1$ e iteração corrente no conjunto de cortes inicial.

Tabela 8.2 – Comparação de tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE considerando os cortes laterais e não considerando os cortes laterais – PMO-2017-03

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2017-03	TC	30	003h 18min 34s	003h 49min 48s	11914	397.13
PMO-2017-03	TC Janela	28	002h 45min 38s	003h 15min 42s	9938	354.93
PMO-2017-03	nadic=5-k2=5	24	001h 16min 22s	001h 44min 29s	4582	190.92
PMO-2017-03	nadic=5-k2=5-SemCorteLateral	23	001h 08min 35s	001h 34min 26s	4115	178.91
PMO-2017-03	nadic=5-k2=10	23	001h 11min 54s	001h 39min 58s	4314	187.57
PMO-2017-03	nadic=5-k2=10-SemCorteLateral	31	002h 05min 25s	002h 32min 50s	7525	242.74
PMO-2017-03	nadic=5-k2=20	31	002h 17min 37s	002h 47min 52s	8257	266.35
PMO-2017-03	nadic=5-k2=20-SemCorteLateral	27	001h 36min 56s	002h 04min 55s	5816	215.41
PMO-2017-03	nadic=5-k2=45	27	002h 05min 40s	002h 35min 59s	7540	279.26
PMO-2017-03	nadic=5-k2=45-SemCorteLateral	27	001h 42min 57s	002h 09min 56s	6177	228.78
PMO-2017-03	nadic=10-k2=5	24	001h 16min 00s	001h 44min 11s	4560	190.00
PMO-2017-03	nadic=10-k2=5-SemCorteLateral	31	001h 58min 42s	002h 28min 18s	7122	229.74
PMO-2017-03	nadic=10-k2=10	23	001h 14min 44s	001h 44min 45s	4484	194.96
PMO-2017-03	nadic=10-k2=10-SemCorteLateral	21	001h 08min 03s	001h 35min 38s	4083	194.43
PMO-2017-03	nadic=10-k2=20	25	001h 23min 38s	001h 53min 54s	5018	200.72
PMO-2017-03	nadic=10-k2=20-SemCorteLateral	23	001h 12min 54s	001h 38min 58s	4374	190.17
PMO-2017-03	nadic=10-k2=45	31	002h 04min 30s	002h 33min 33s	7470	240.97
PMO-2017-03	nadic=10-k2=45-SemCorteLateral	23	001h 13min 09s	001h 39min 19s	4389	190.83
PMO-2017-03	nadic=15-k2=5	24	001h 17min 41s	001h 46min 16s	4661	194.21
PMO-2017-03	nadic=15-k2=5-SemCorteLateral	27	001h 31min 49s	001h 58min 36s	5509	204.04
PMO-2017-03	nadic=15-k2=10	23	001h 10min 33s	001h 39min 08s	4233	184.04
PMO-2017-03	nadic=15-k2=10-SemCorteLateral	30	001h 57min 00s	002h 24min 17s	7020	234.00
PMO-2017-03	nadic=15-k2=20	25	001h 25min 40s	001h 55min 46s	5140	205.60
PMO-2017-03	nadic=15-k2=20-SemCorteLateral	32	002h 19min 53s	002h 48min 30s	8393	262.28
PMO-2017-03	nadic=15-k2=45	31	002h 05min 50s	002h 35min 28s	7550	243.55
PMO-2017-03	nadic=15-k2=45-SemCorteLateral	30	002h 14min 13s	002h 45min 31s	8053	268.43

Observa-se que o caso com menor tempo computacional foi o caso SC_nadic=10 e K2=10, sem considerar os cortes laterais.

A Tabela 8.3 corresponde à Tabela 4.24, referente ao PMO de Maio de 2017, adicionando-se os resultados sem considerar os cortes construídos no período *iper* + 1 e iteração corrente no conjunto de cortes inicial.

Tabela 8.3 – Comparação de tempo computacional para o cálculo da política de operação e execução do modelo NEWAVE considerando os cortes laterais e não considerando os cortes laterais – PMO-2017-05

CASO	PARÂMETROS	TOTAL ITERAÇÕES	CÁLC. POLÍTICA	TEMPO TOTAL	CÁLCULO DA POLÍTICA	
					TEMPO TOTAL (s)	TEMPO MÉDIO POR ITERAÇÃO (s)
PMO-2017-05	TC	27	002h 35min 10s	003h 04min 02s	9301	344.48
PMO-2017-05	TC Janela	25	002h 10min 19s	002h 39min 13s	7819	312.76
PMO-2017-05	nadic=5-k2=5	23	001h 15min 37s	001h 44min 35s	4537	197.26
PMO-2017-05	nadic=5-k2=5-SemCorteLateral	24	001h 14min 35s	001h 41min 18s	4475	186.46
PMO-2017-05	nadic=5-k2=10	26	001h 53min 00s	002h 23min 43s	6780	260.77
PMO-2017-05	nadic=5-k2=10-SemCorteLateral	28	001h 39min 53s	002h 08min 07s	5993	214.04
PMO-2017-05	nadic=5-k2=20	25	001h 22min 26s	001h 50min 25s	4946	197.84
PMO-2017-05	nadic=5-k2=20-SemCorteLateral	28	001h 47min 59s	002h 15min 21s	6479	231.39
PMO-2017-05	nadic=5-k2=45	25	001h 24min 30s	001h 52min 44s	5070	202.80
PMO-2017-05	nadic=5-k2=45-SemCorteLateral	28	001h 44min 12s	002h 11min 21s	6252	223.29
PMO-2017-05	nadic=10-k2=5	23	001h 18min 12s	001h 46min 46s	4692	204.00
PMO-2017-05	nadic=10-k2=5-SemCorteLateral	24	001h 13min 57s	001h 40min 13s	4437	184.88
PMO-2017-05	nadic=10-k2=10	26	001h 30min 40s	001h 59min 33s	5440	209.23
PMO-2017-05	nadic=10-k2=10-SemCorteLateral	24	001h 35min 59s	002h 14min 21s	5759	239.96
PMO-2017-05	nadic=10-k2=20	25	001h 23min 18s	001h 52min 18s	4998	199.92
PMO-2017-05	nadic=10-k2=20-SemCorteLateral	20	001h 01min 43s	001h 28min 06s	3703	185.15
PMO-2017-05	nadic=10-k2=45	25	001h 24min 39s	001h 52min 49s	5079	203.16
PMO-2017-05	nadic=10-k2=45-SemCorteLateral	20	001h 00min 01s	001h 26min 00s	3601	180.05
PMO-2017-05	nadic=15-k2=5	23	001h 08min 20s	001h 36min 17s	4100	178.26
PMO-2017-05	nadic=15-k2=5-SemCorteLateral	19	000h 50min 33s	001h 15min 50s	3033	159.63
PMO-2017-05	nadic=15-k2=10	26	001h 35min 57s	002h 05min 37s	5757	221.42
PMO-2017-05	nadic=15-k2=10-SemCorteLateral	23	001h 11min 39s	001h 37min 43s	4299	186.91
PMO-2017-05	nadic=15-k2=20	25	001h 26min 33s	001h 55min 09s	5193	207.72
PMO-2017-05	nadic=15-k2=20-SemCorteLateral	23	001h 12min 11s	001h 38min 31s	4331	188.30
PMO-2017-05	nadic=15-k2=45	25	001h 22min 52s	001h 51min 12s	4972	198.88
PMO-2017-05	nadic=15-k2=45-SemCorteLateral	23	001h 17min 29s	001h 44min 08s	4649	202.13

Observa-se que o caso com menor tempo computacional foi o caso SC_nadic=15 e K2=5, sem considerar os cortes laterais.

9 ANEXO II

Em consonância à seção 4.5, referente ao PMO de Dez 2016, neste anexo apresenta-se a análise estatística dos resultados obtidos para as variáveis de interesse nos resultados do modelo NEWAVE: EARM, GHIDR, GTER, CMO, para os para os PMOs de Jan 2017, Fev 2017, Mar 2017, Abr 2017 e Mai 2017 e PDE 2024. Serão mostrados testes de comparação dos resultados entre as estratégias TC, TC_Janela e a variante de SC que apresentou menor tempo computacional.

PMO Jan 2017

As Figuras 8.1 e 8.2 ilustram a evolução do valor esperado dos custos marginais de operação e geração térmica ao longo do período de planejamento respectivamente, para os quatro subsistemas da configuração.

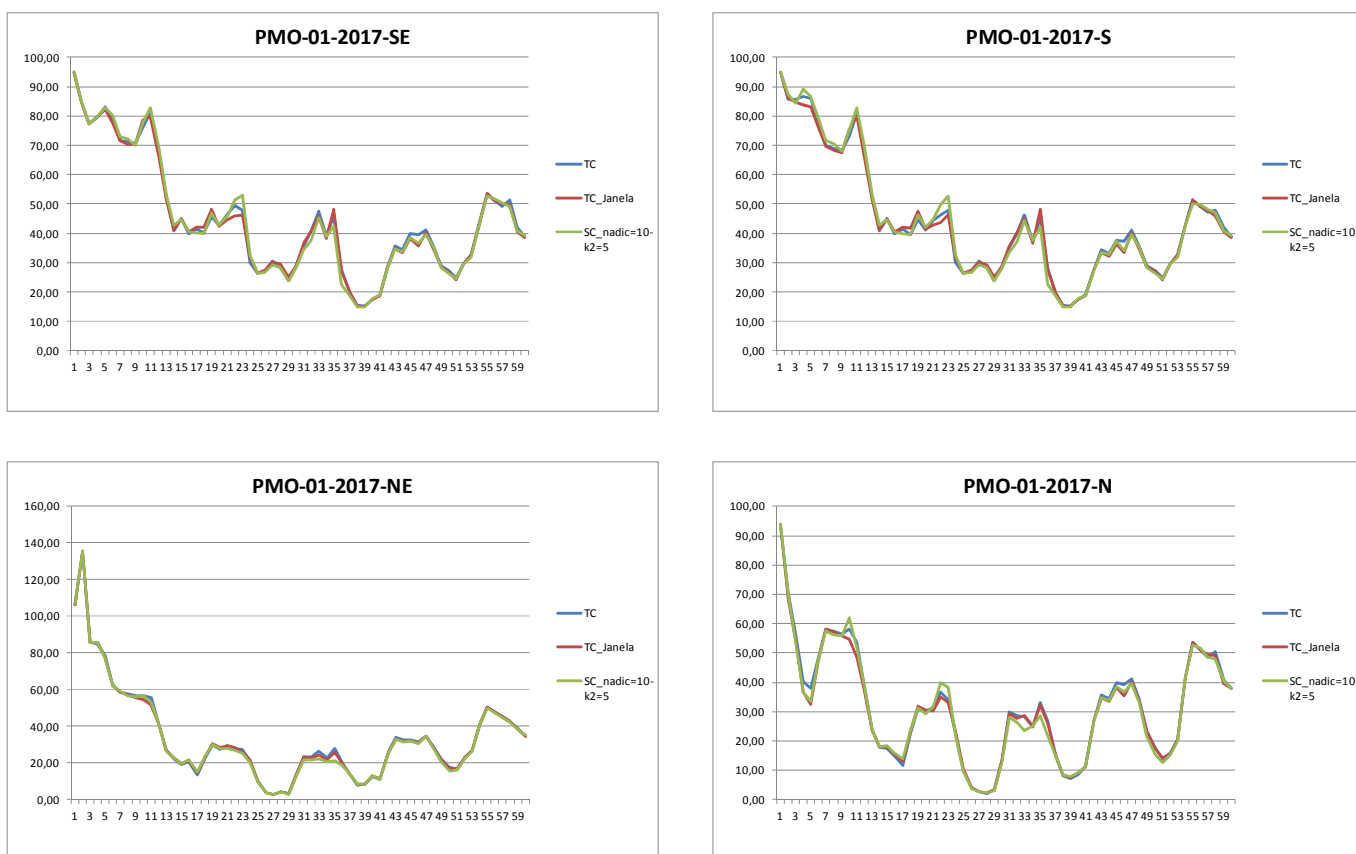


Figura 9.1 - Evolução dos CMOs médios ao longo do período de planejamento – PMO Jan 2017

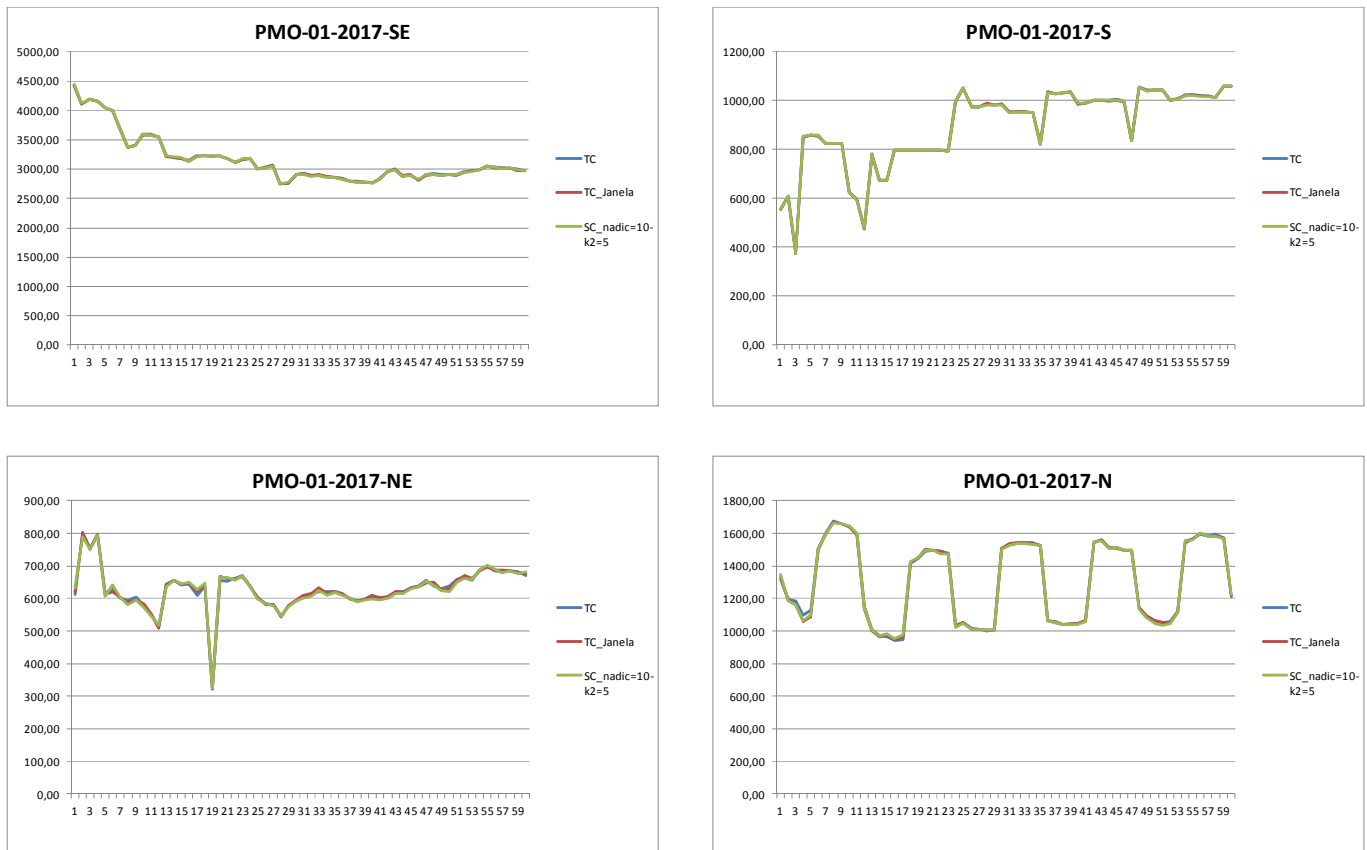
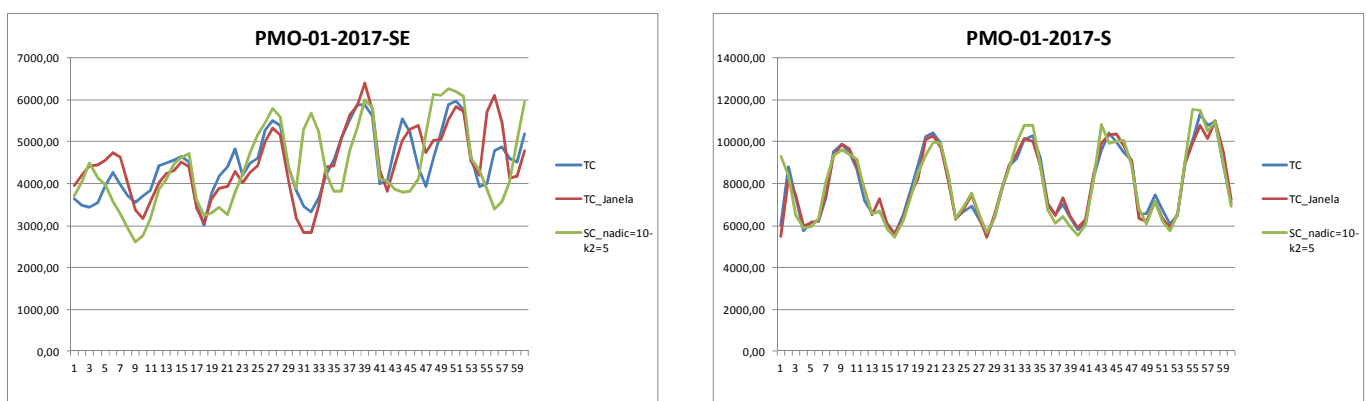


Figura 9.2 - Evolução da geração térmica média ao longo do período de planejamento – PMO Jan 2017

As Figuras 8.3 e 8.4 ilustram a evolução do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento respectivamente, para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



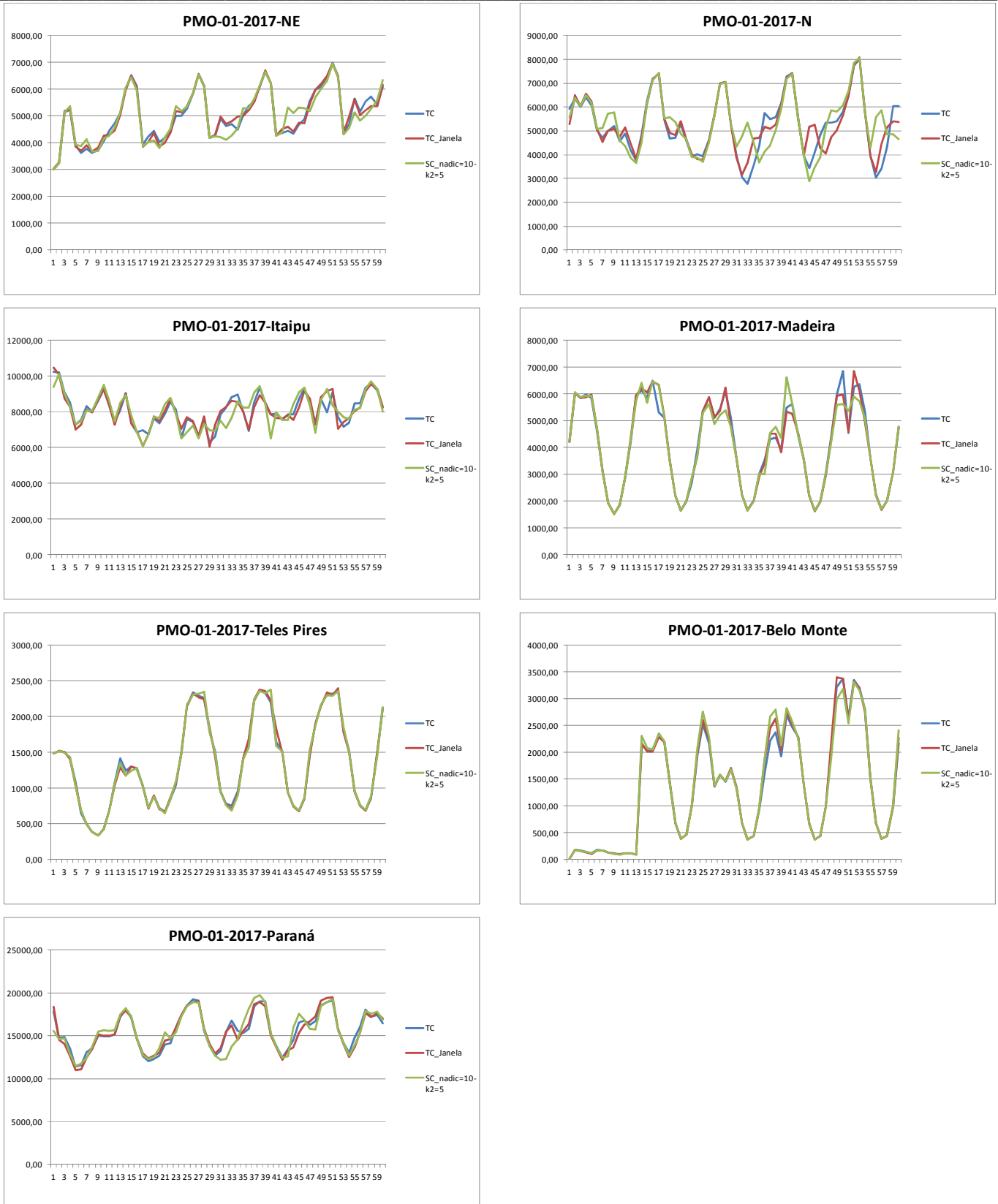
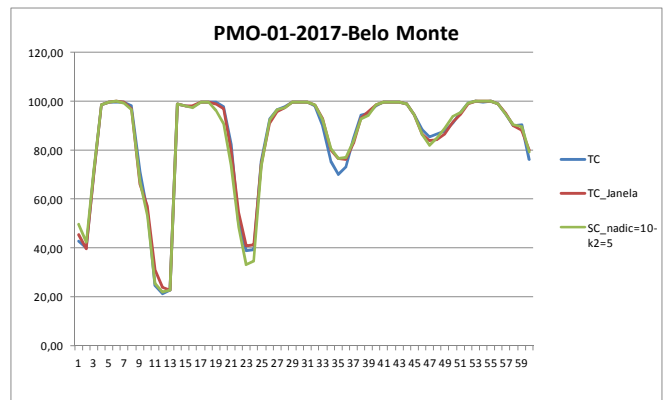
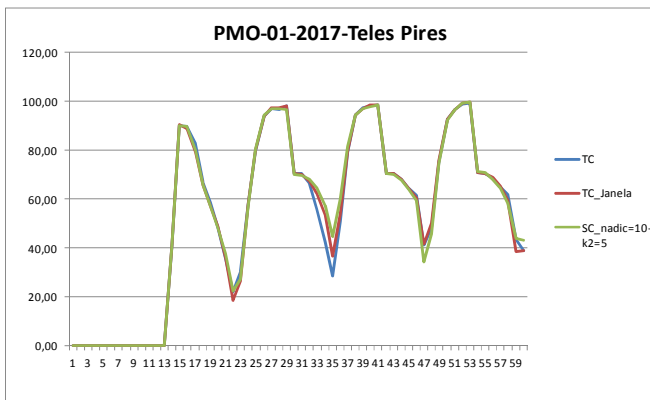
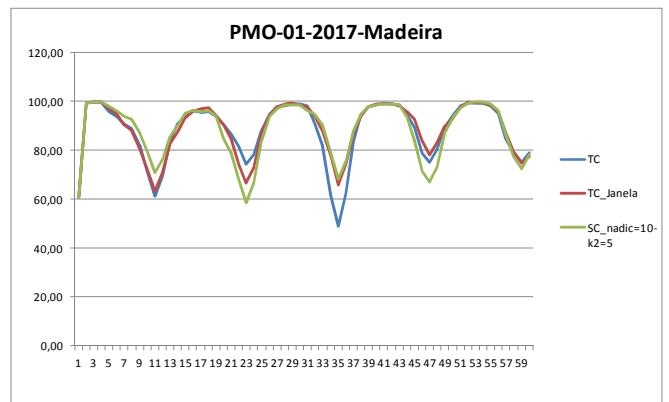
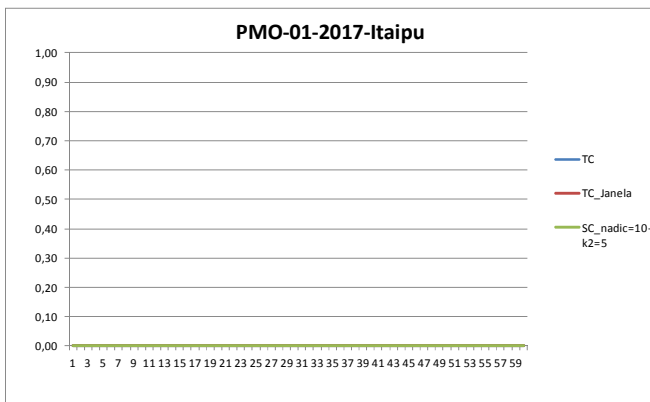
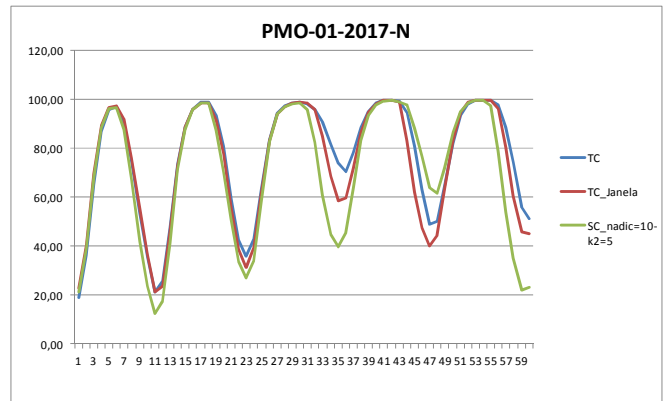
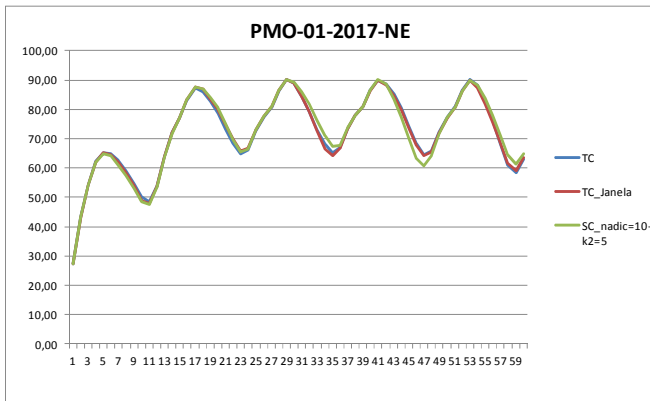
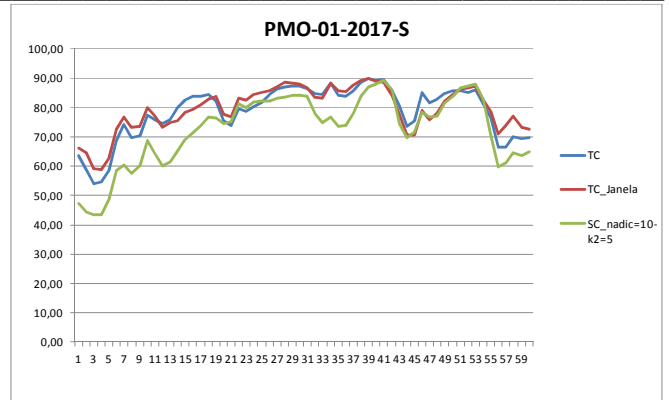
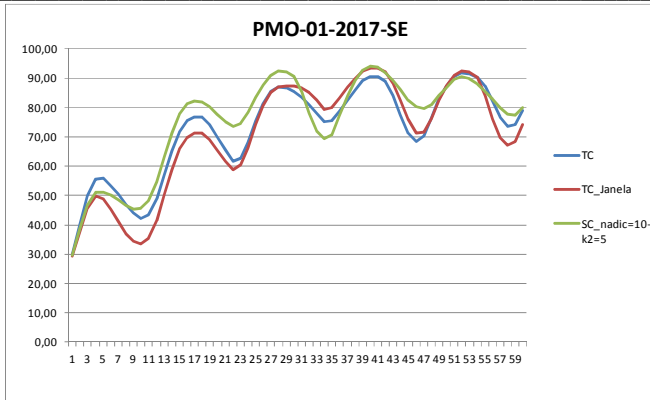


Figura 9.3 - Evolução da geração hidráulica média por REE ao longo do período de planejamento – PMO Jan 2017



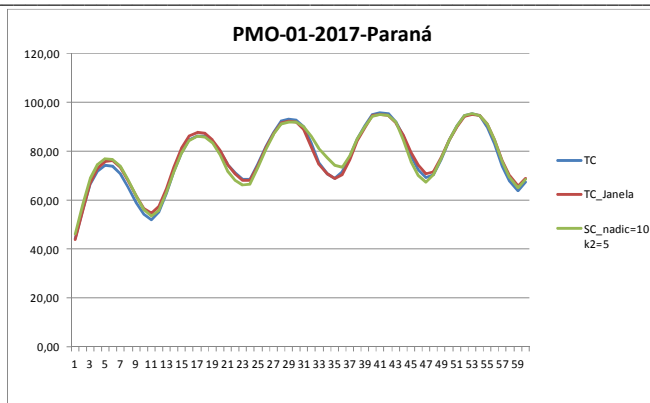


Figura 9.4 - Evolução do armazenamento médio por REE ao longo do período de planejamento – PMO Jan 2017

Estão ilustradas na Figura 8.5 as evoluções do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.

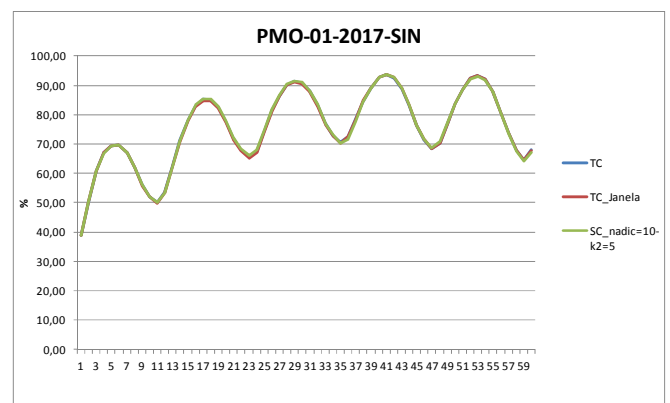
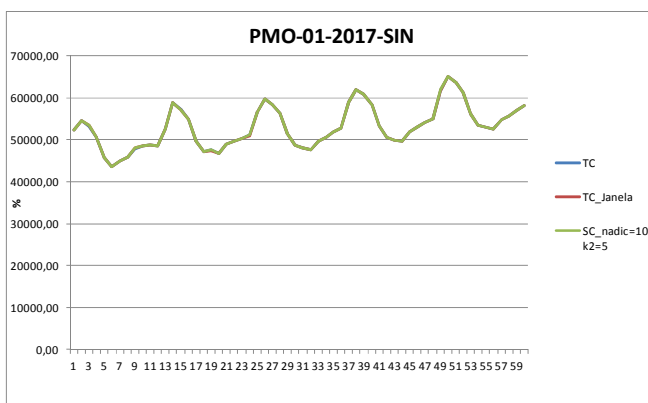


Figura 9.5 - Evolução da geração hidráulica total e do armazenamento médio do SIN ao longo do período de planejamento – PMO Jan 2017

PMO Fev 2017

As Figuras 8.6 e 8.7 ilustram a evolução do valor esperado dos custos marginais de operação e geração térmica ao longo do período de planejamento respectivamente, para os quatro subsistemas da configuração.

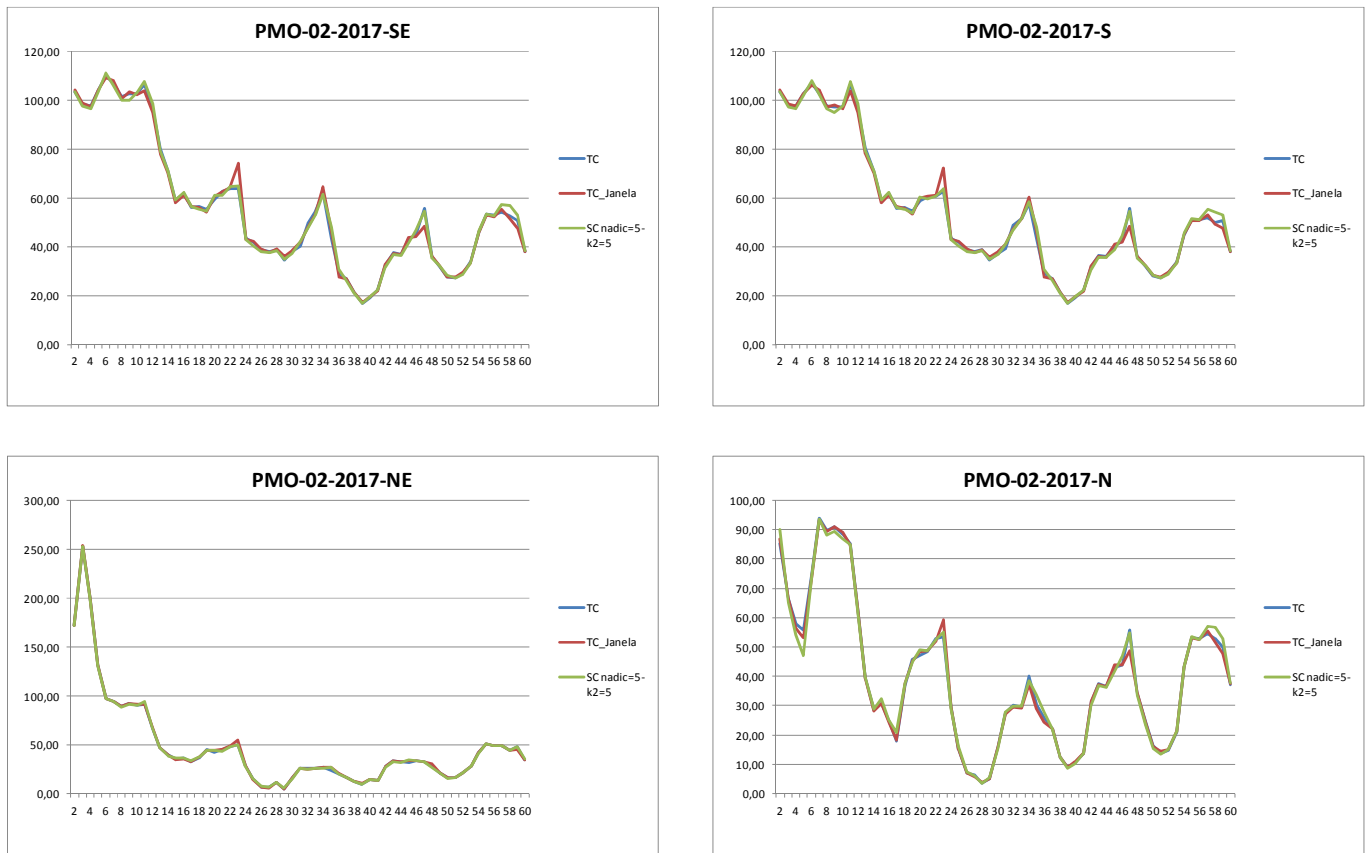
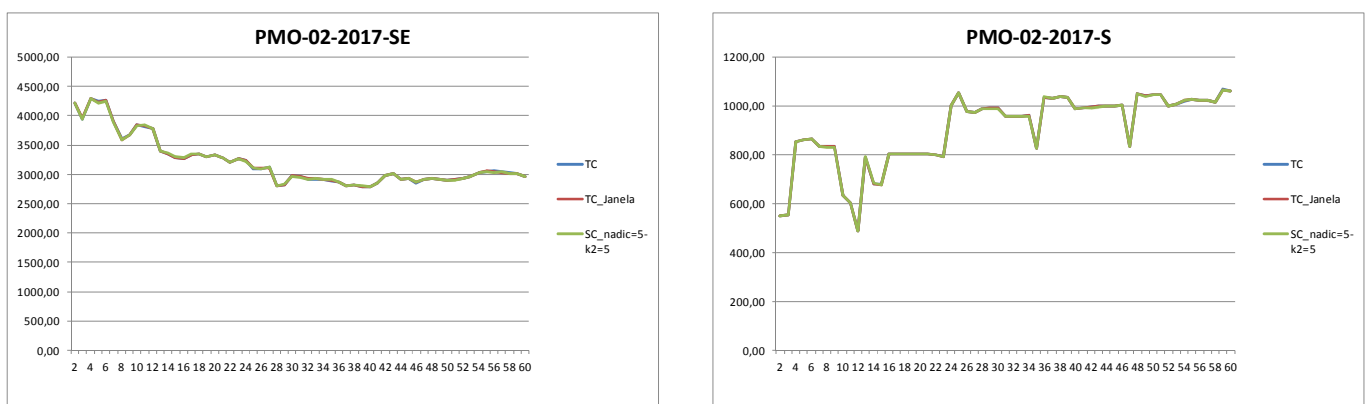


Figura 9.6 - Evolução dos CMOs médios ao longo do período de planejamento – PMO Fev 2017

As Figuras 8.8 e 8.9 ilustram a evolução do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento respectivamente, para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



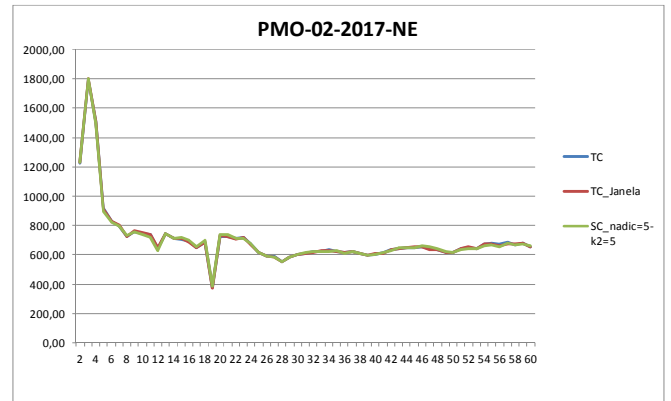
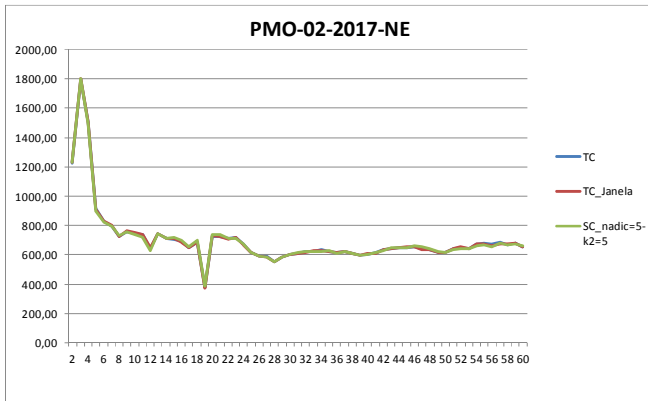
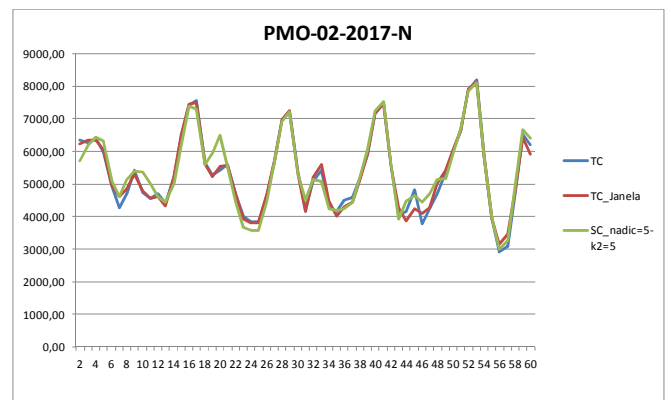
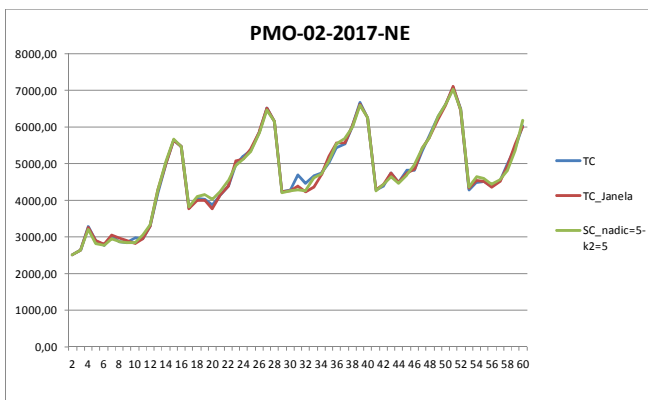
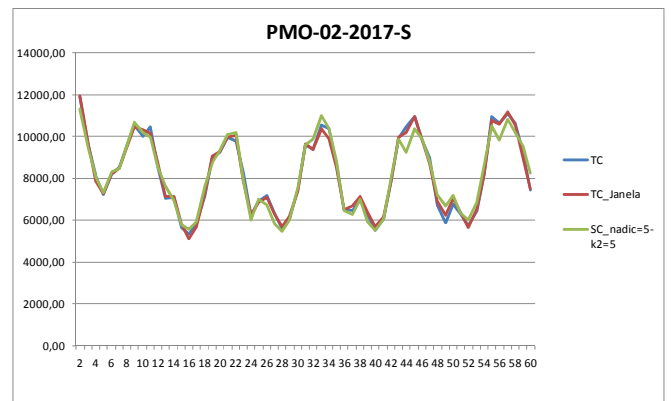
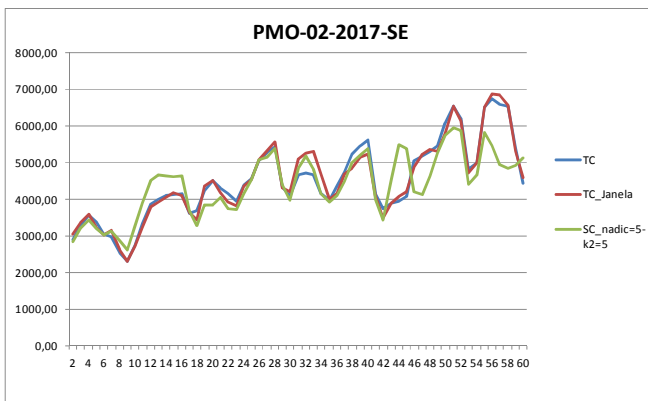


Figura 9.7 - Evolução da geração térmica média ao longo do período de planejamento – PMO Fev 2017



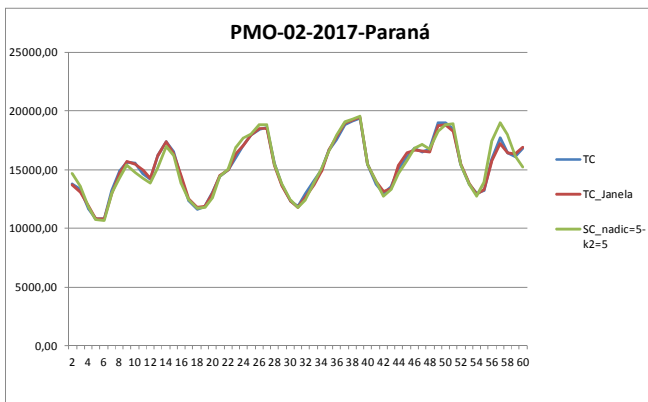
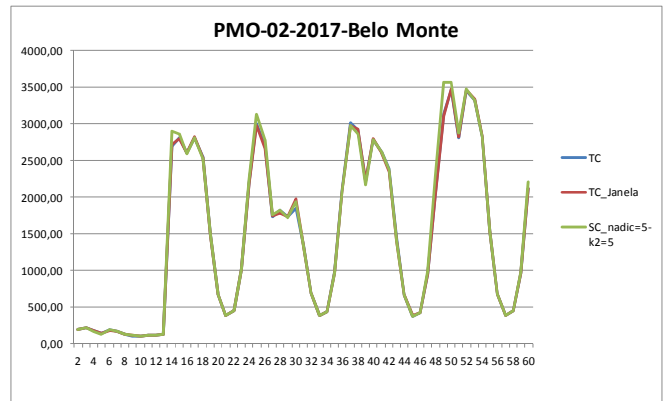
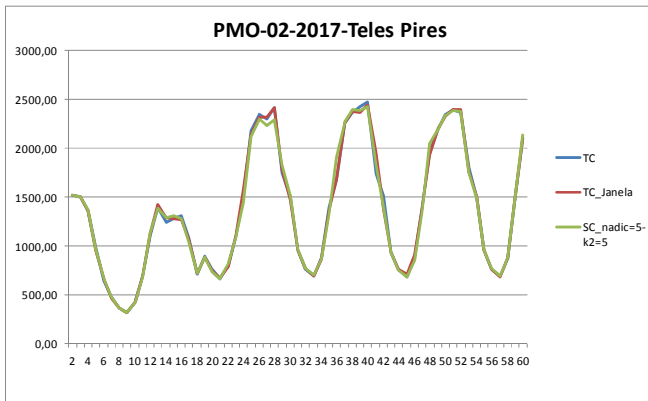
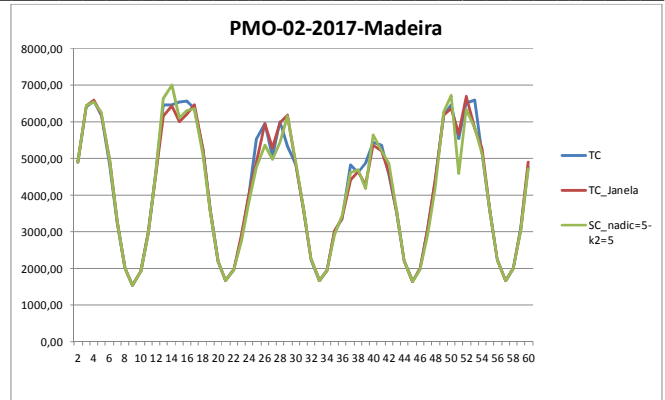
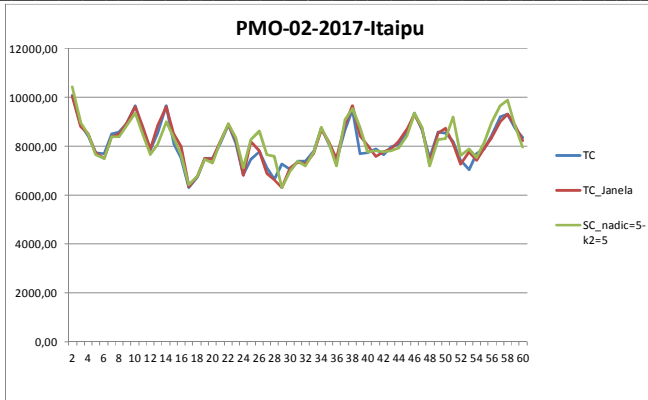
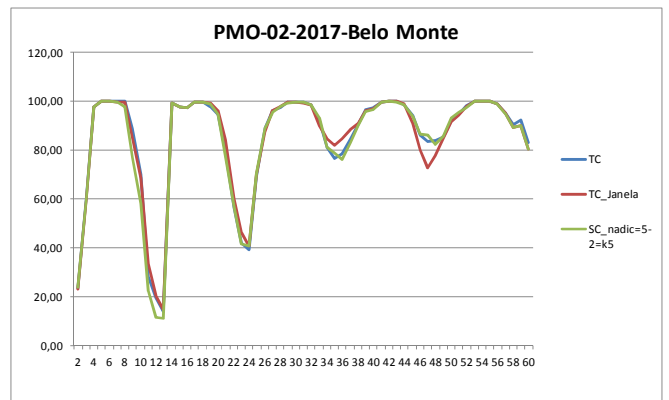
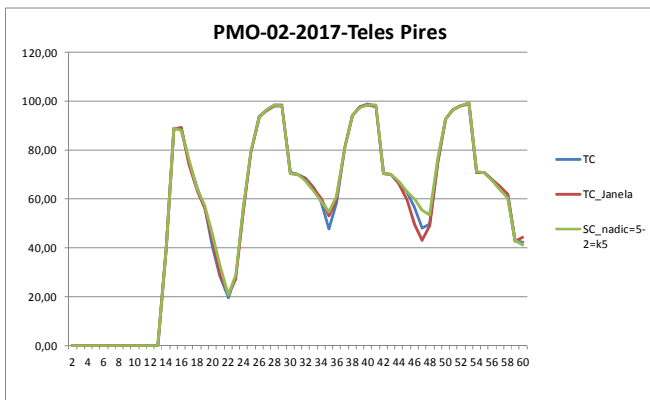
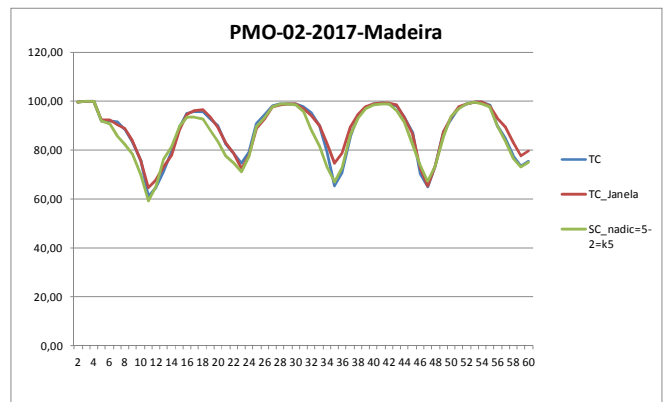
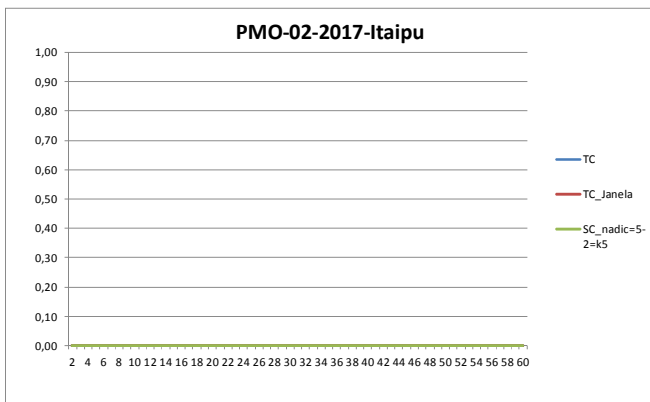
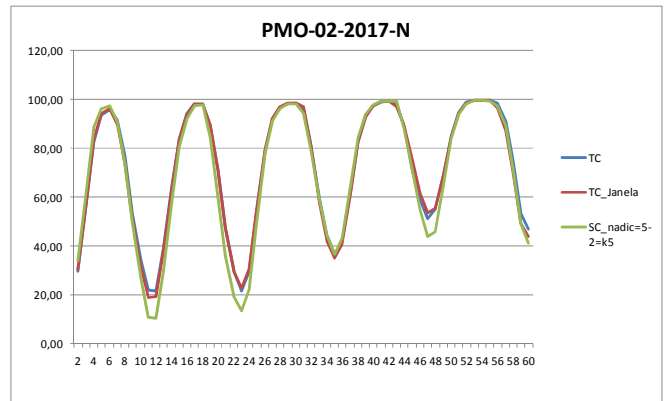
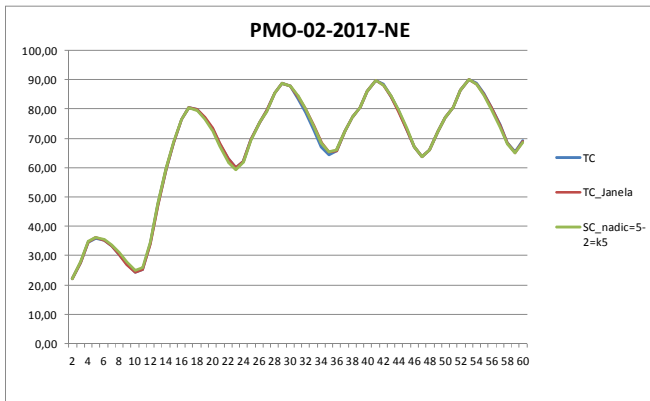
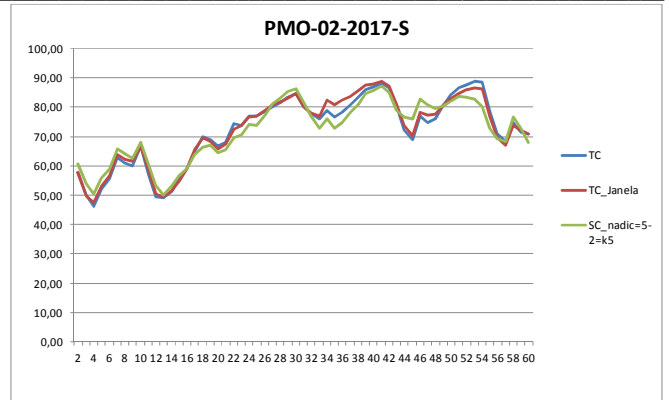
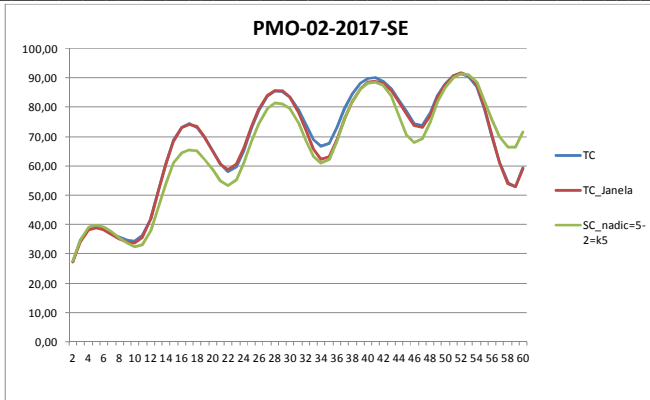


Figura 9.8 - Evolução da geração hidráulica média por REE ao longo do período de planejamento – PMO Fev 2017



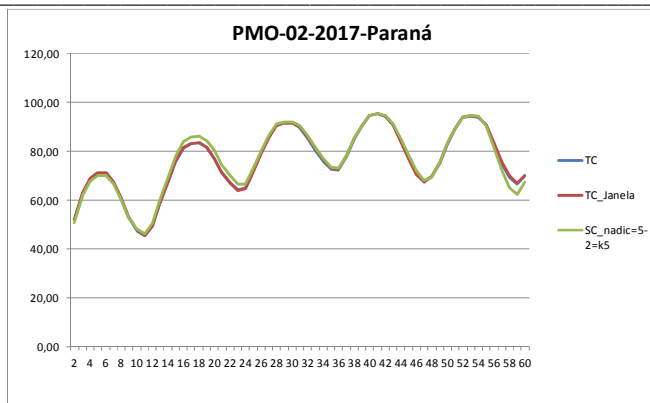


Figura 9.9 - Evolução do armazenamento médio por REE ao longo do período de planejamento – PMO Fev 2017

Estão ilustradas na Figura 8.10 as evoluções do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.

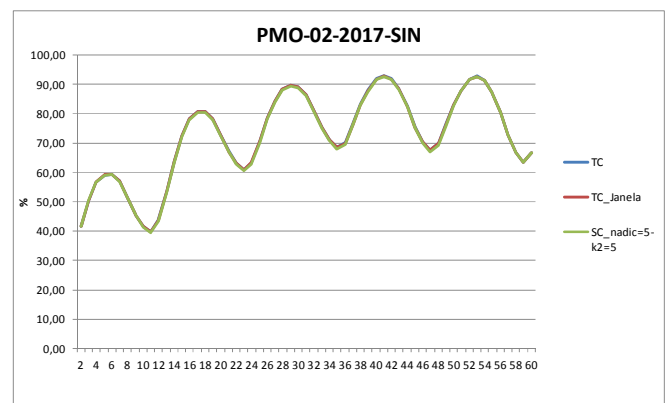
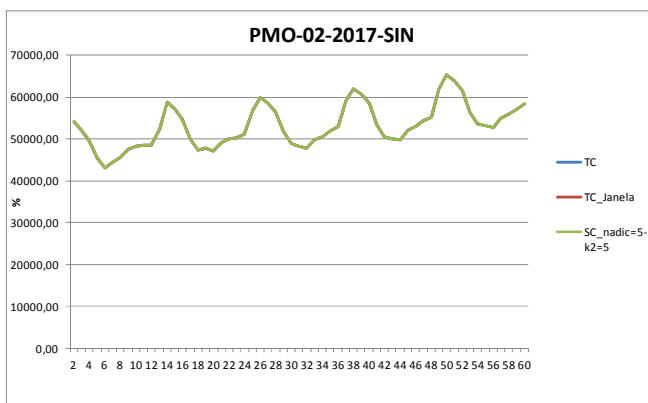


Figura 9.10 - Evolução da geração hidráulica total e do armazenamento médio do SIN ao longo do período de planejamento – PMO F 2017

PMO Mar 2017

As Figuras 8.11 e 8.12 ilustram a evolução do valor esperado dos custos marginais de operação e geração térmica ao longo do período de planejamento respectivamente, para os quatro subsistemas da configuração.

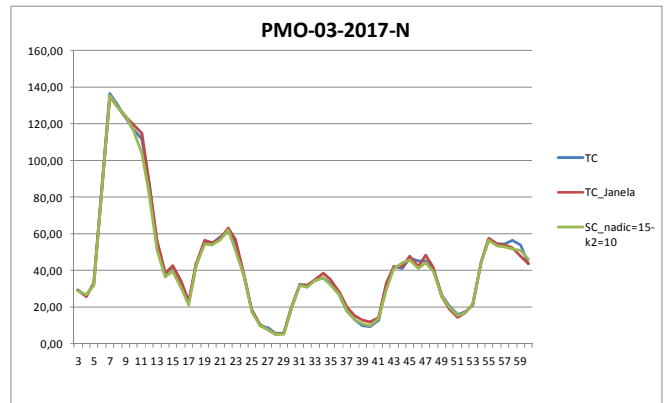
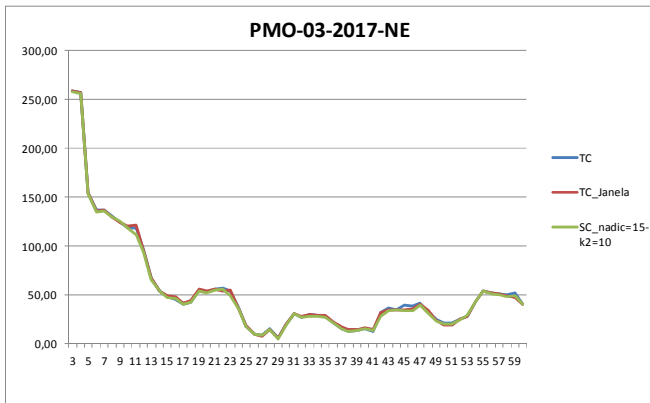
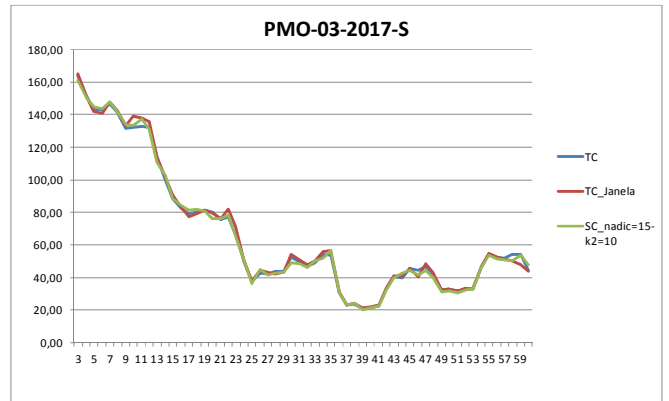
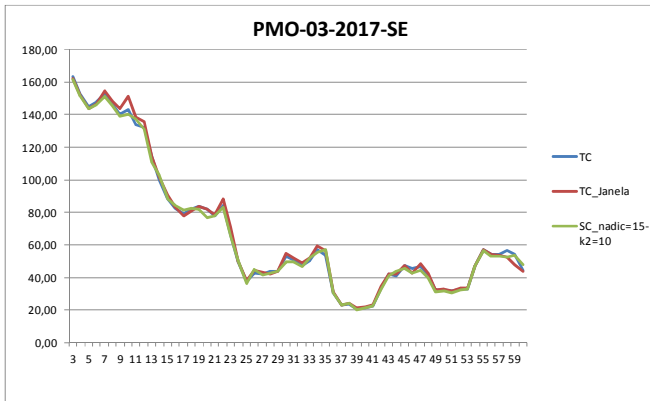
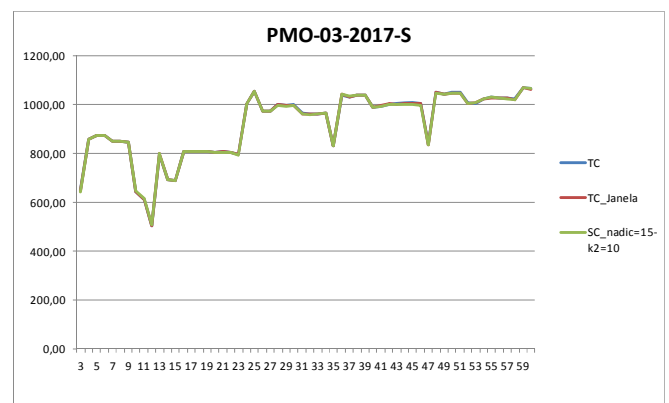
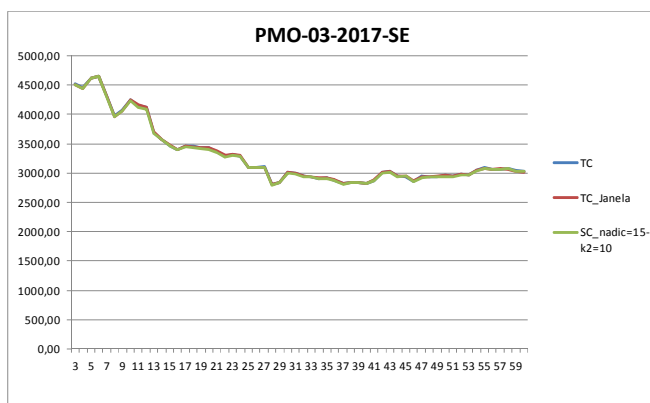


Figura 9.11 - Evolução dos CMOs médios ao longo do período de planejamento – PMO Mar 2017



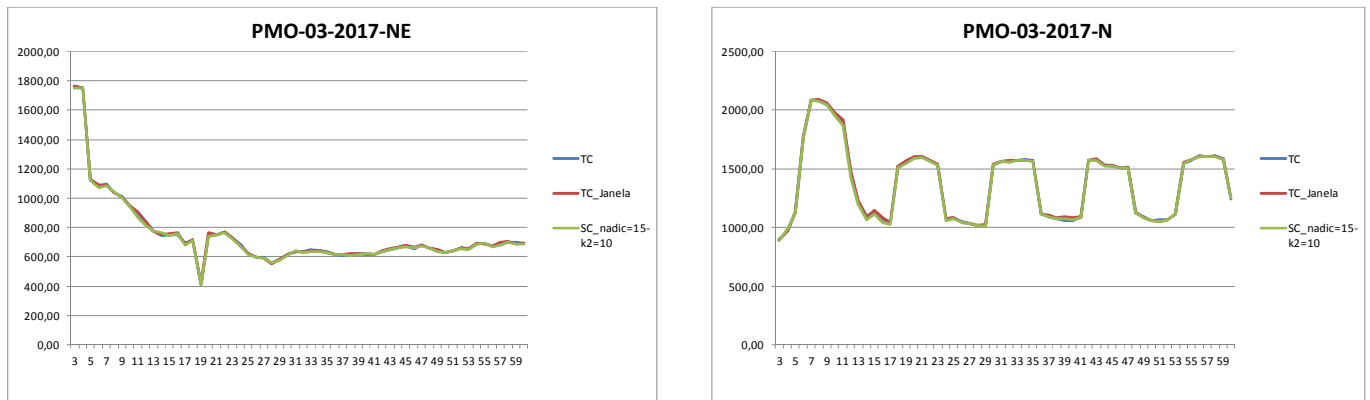
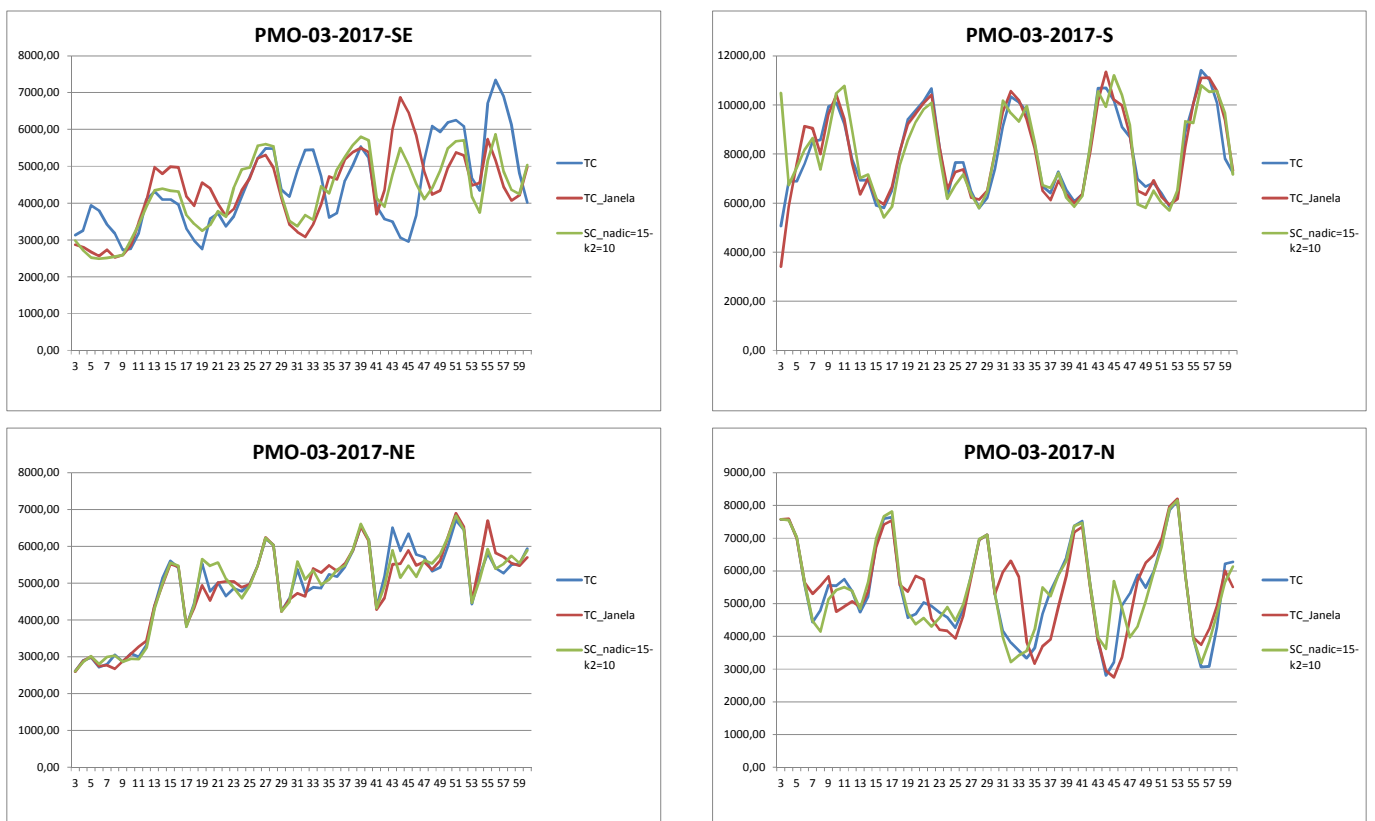


Figura 9.12 - Evolução da geração térmica média ao longo do período de planejamento – PMO Mar 2017

As Figuras 8.13 e 8.14 ilustram a evolução do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento respectivamente, para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



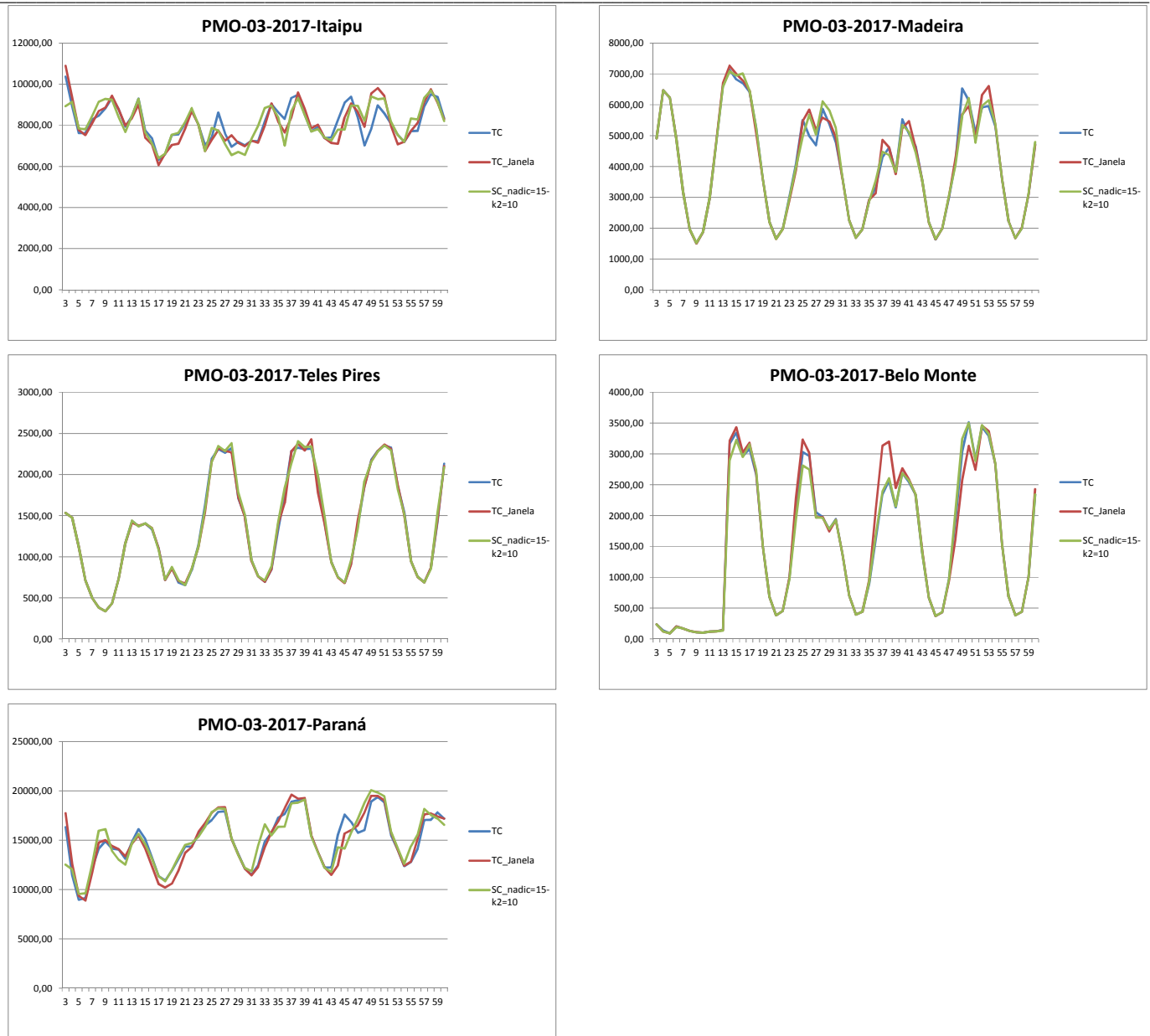
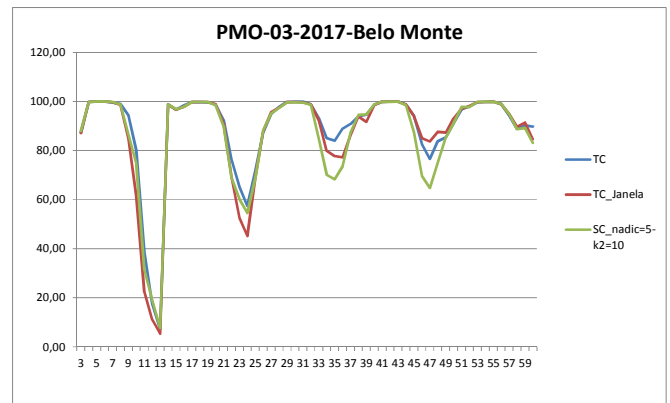
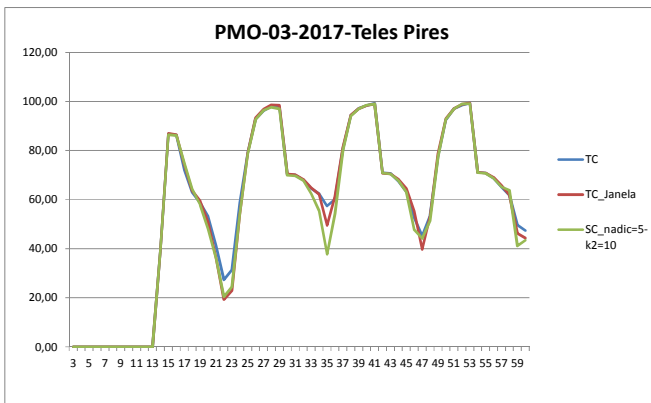
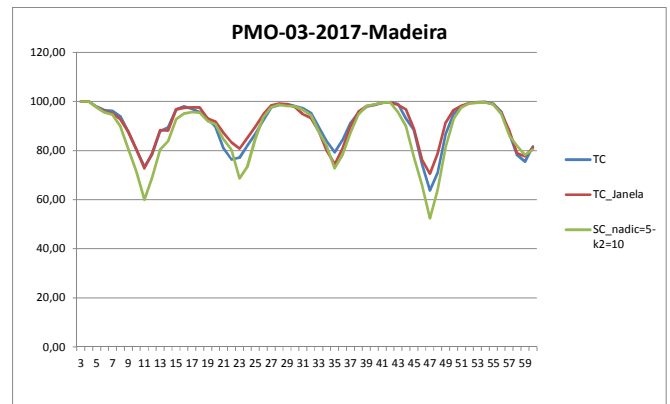
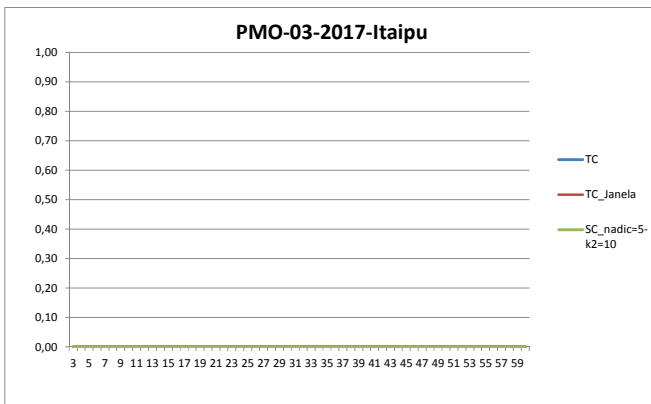
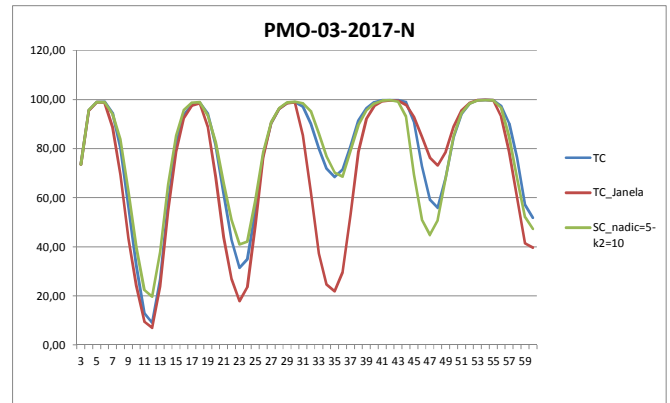
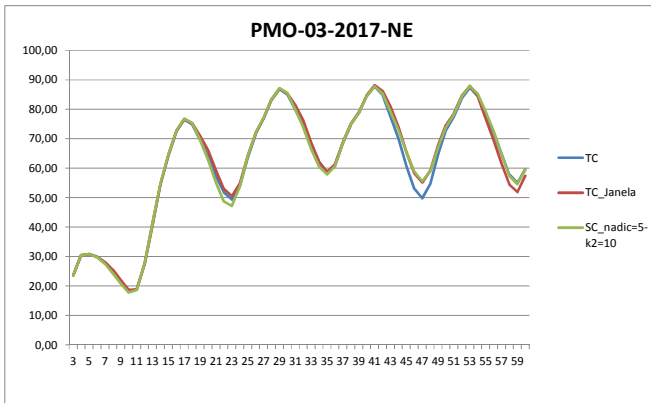
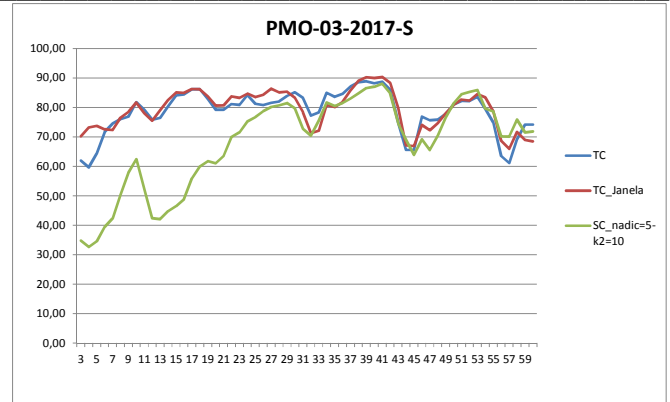
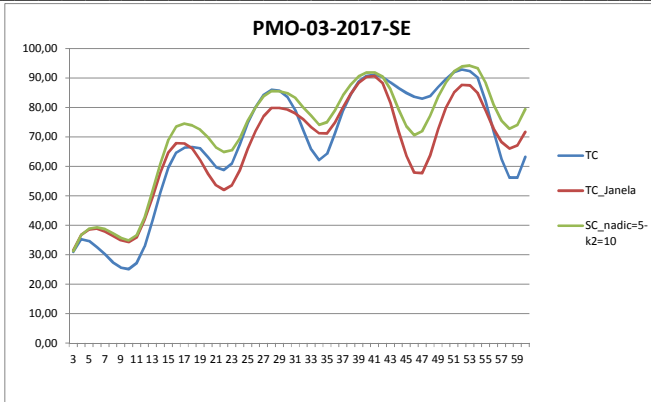


Figura 9.13 - Evolução da geração hidráulica média por REE ao longo do período de planejamento – PMO Mar 2017



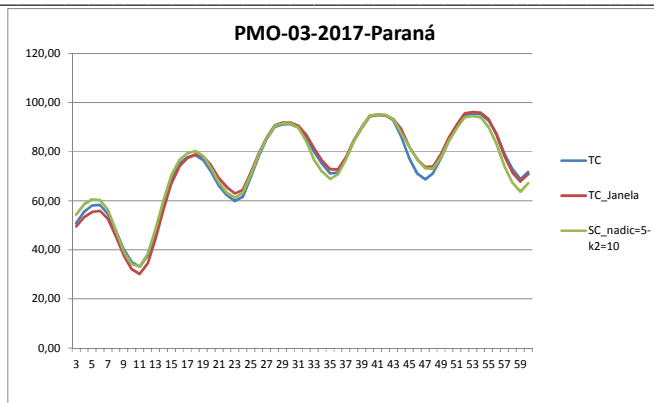


Figura 9.14 - Evolução do armazenamento médio por REE ao longo do período de planejamento – PMO Mar 2017

Estão ilustradas na Figura 8.15 as evoluções do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.

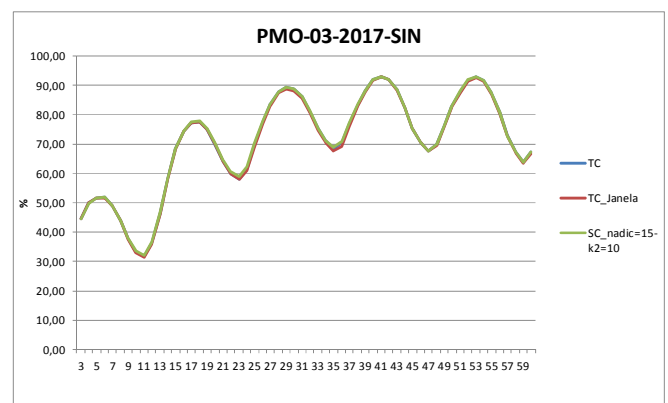
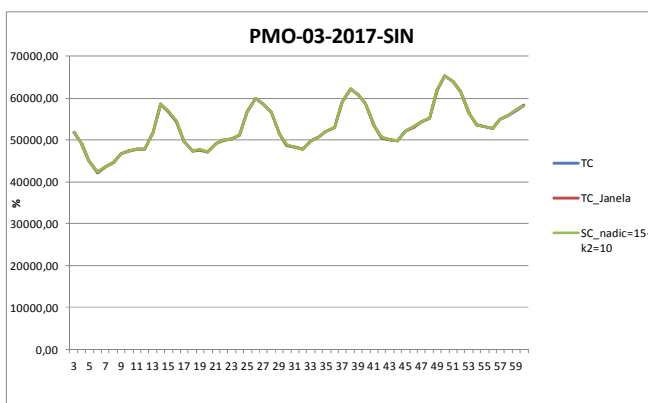


Figura 9.15 - Evolução da geração hidráulica total e do armazenamento médio do SIN ao longo do período de planejamento – PMO Mar 2017

PMO Abr 2017

As Figuras 8.16 e 8.17 ilustram a evolução do valor esperado dos custos marginais de operação e geração térmica ao longo do período de planejamento respectivamente, para os quatro subsistemas da configuração.

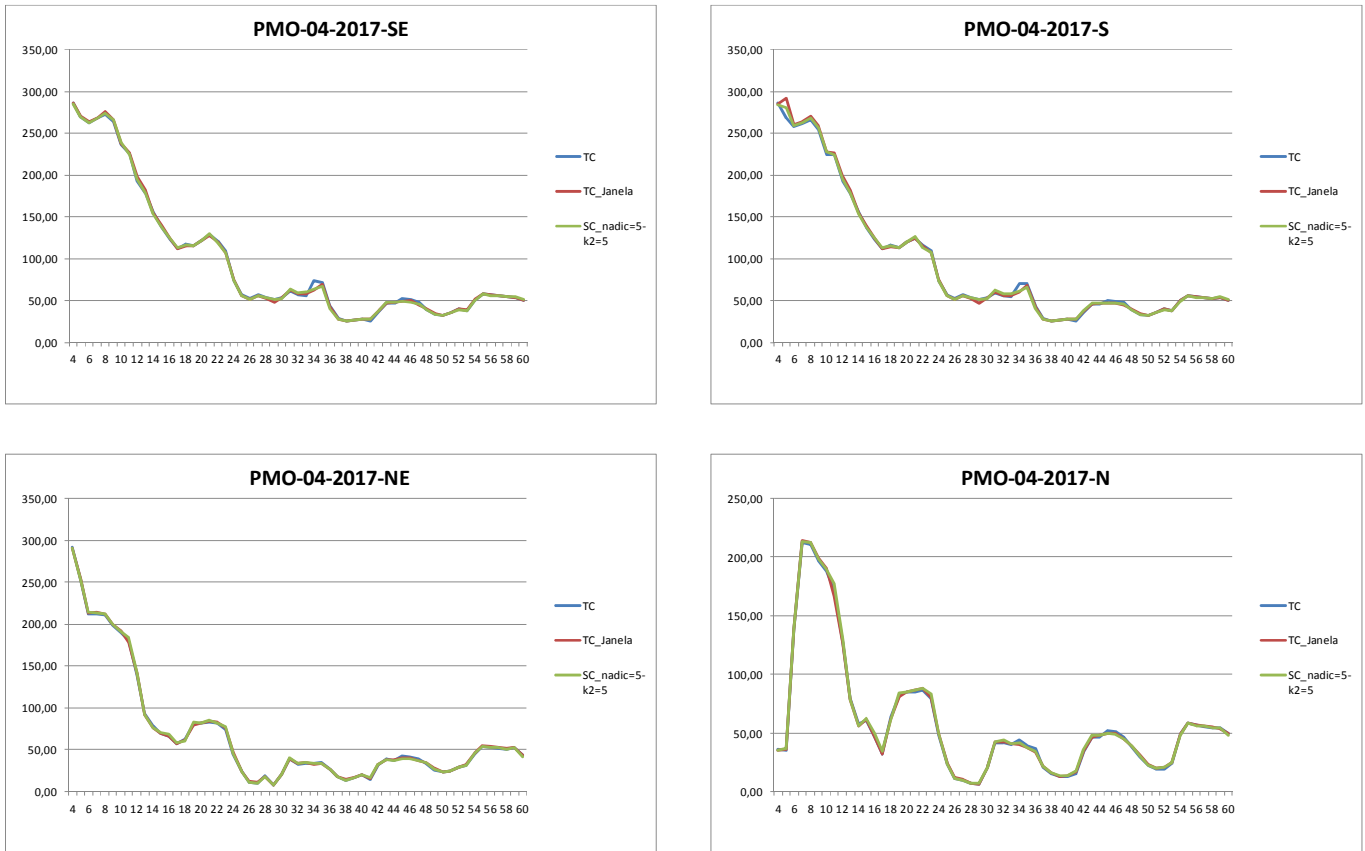
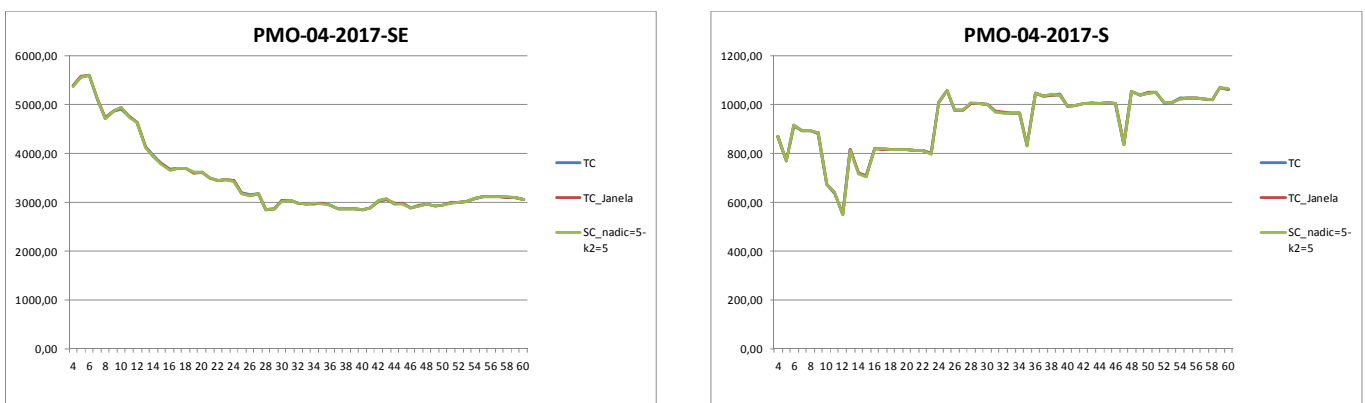


Figura 9.16 - Evolução dos CMOs médios ao longo do período de planejamento – PMO Abr 2017



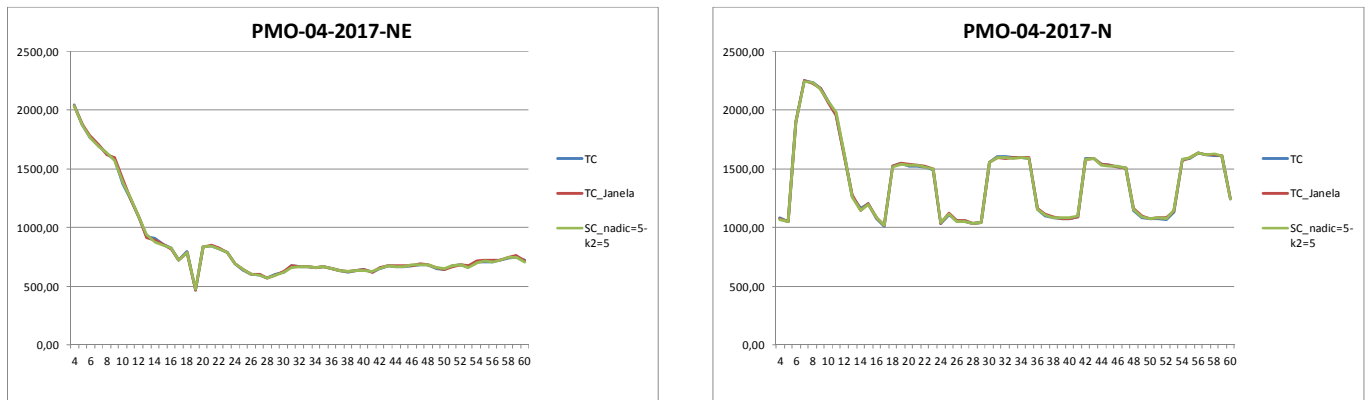
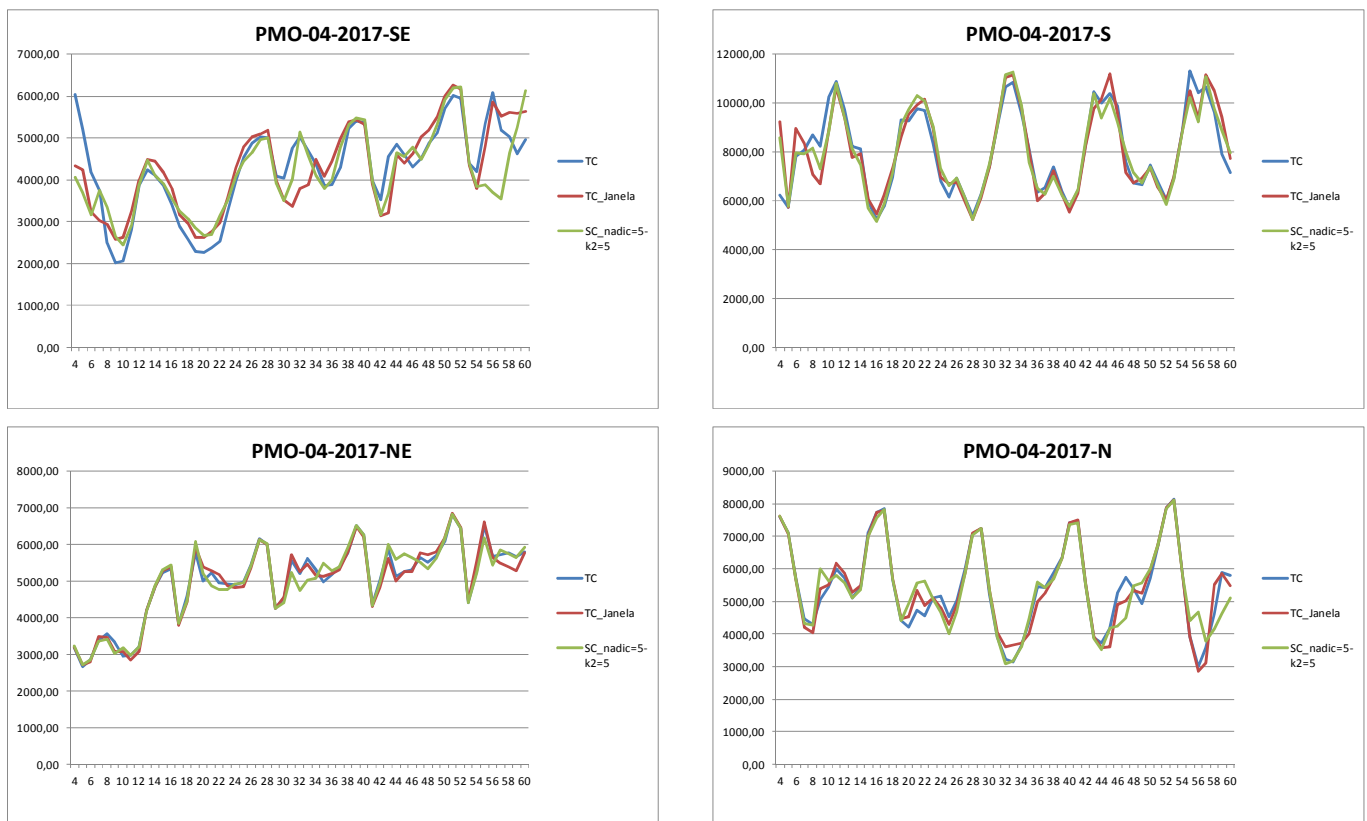


Figura 9.17 - Evolução da geração térmica média ao longo do período de planejamento – PMO Abr 2017

As Figuras 8.18 e 8.19 ilustram a evolução do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d'água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento respectivamente, para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



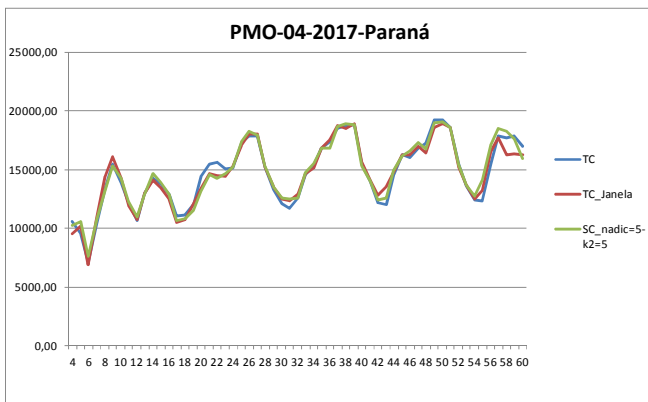
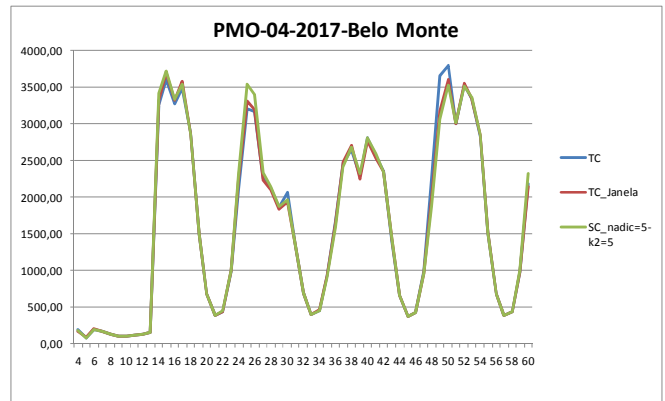
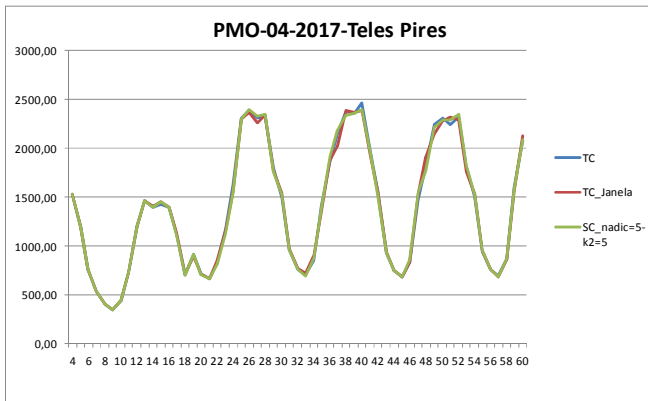
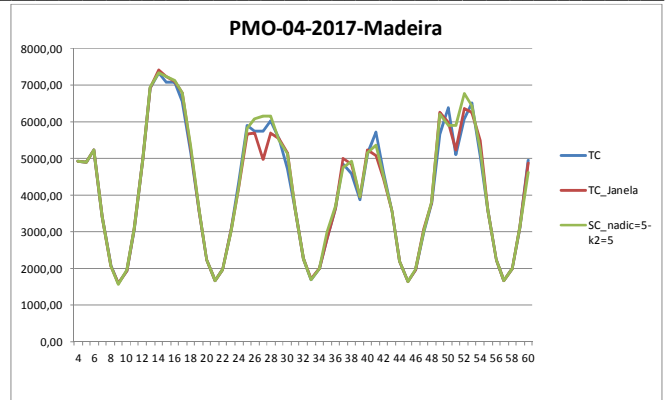
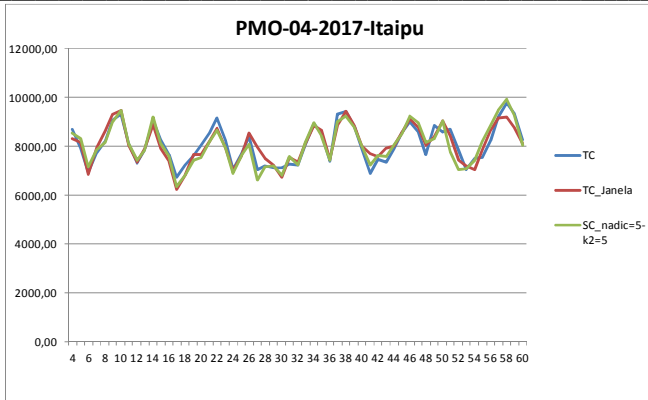
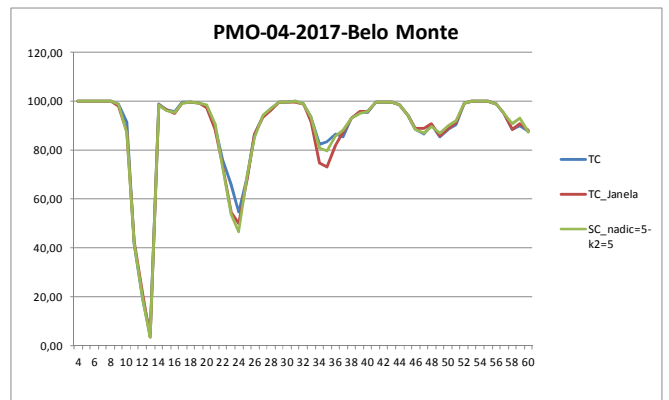
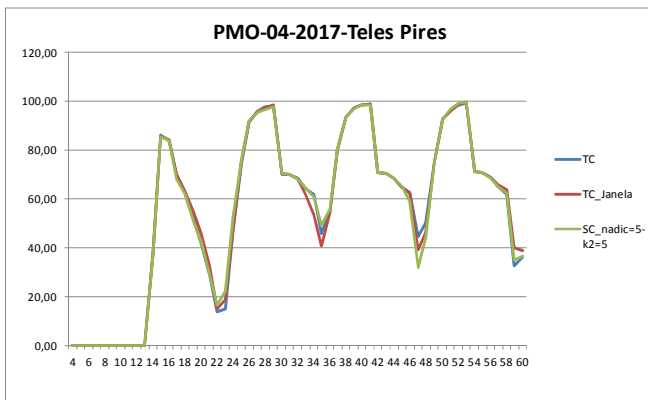
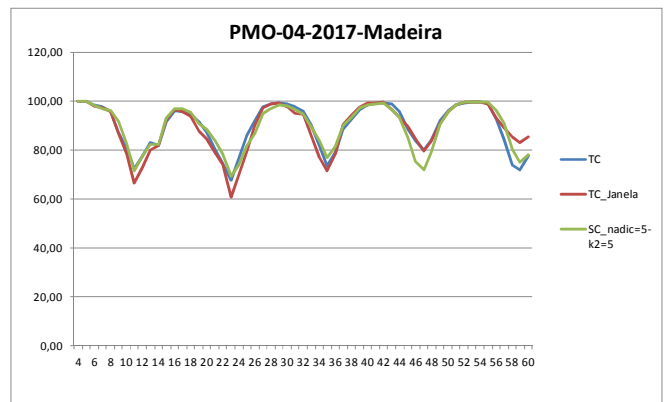
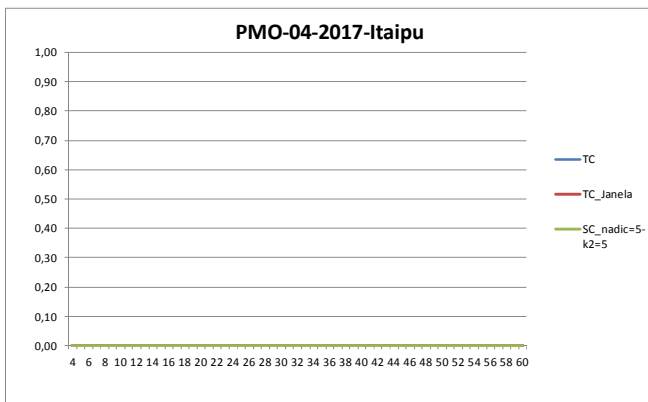
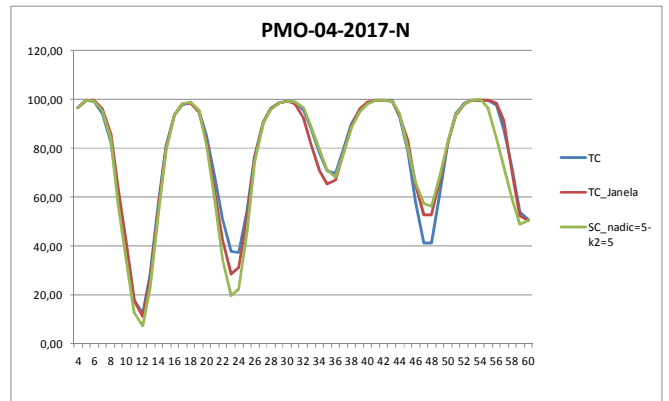
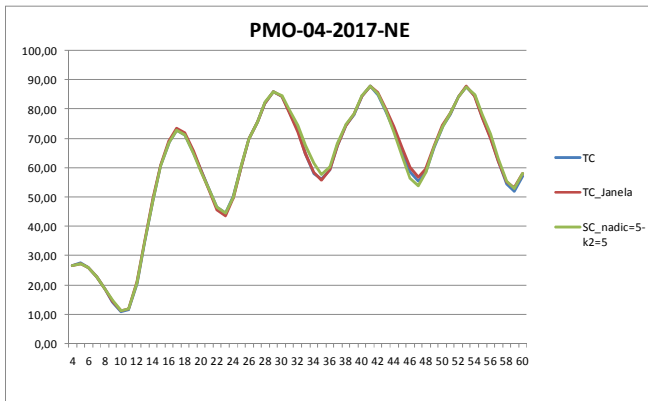
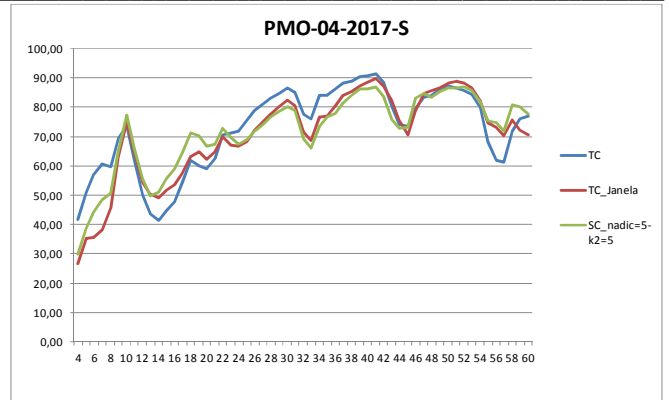
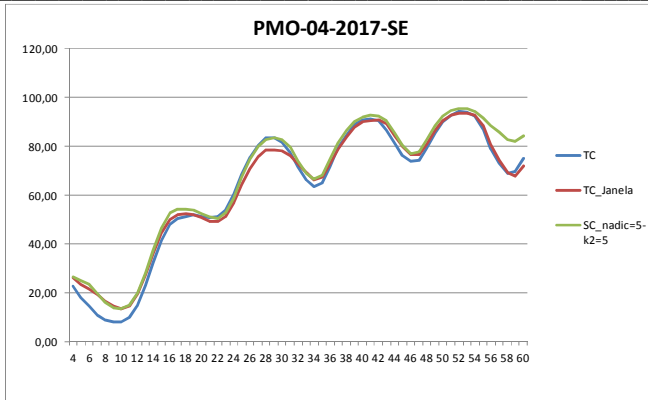


Figura 9.18 - Evolução da geração hidráulica média por REE ao longo do período de planejamento – PMO Abr 2017



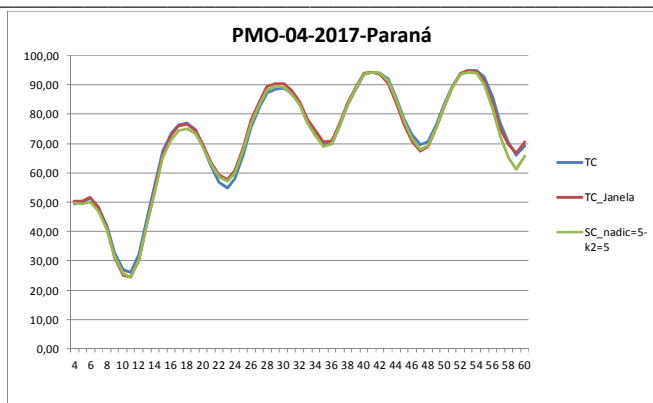


Figura 9.19 - Evolução do armazenamento médio por REE ao longo do período de planejamento – PMO Abr 2017

Estão ilustradas na Figura 8.20 as evoluções do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d'água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.

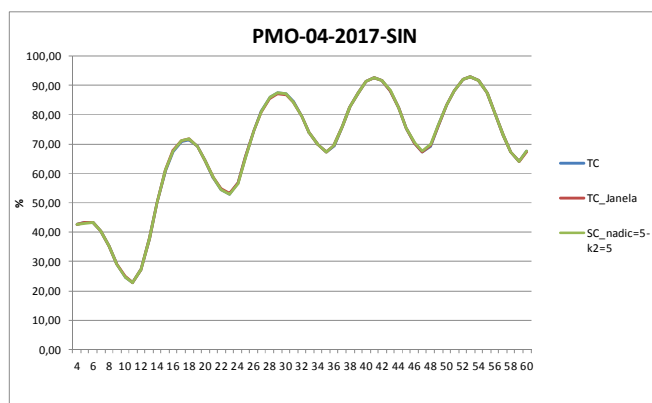
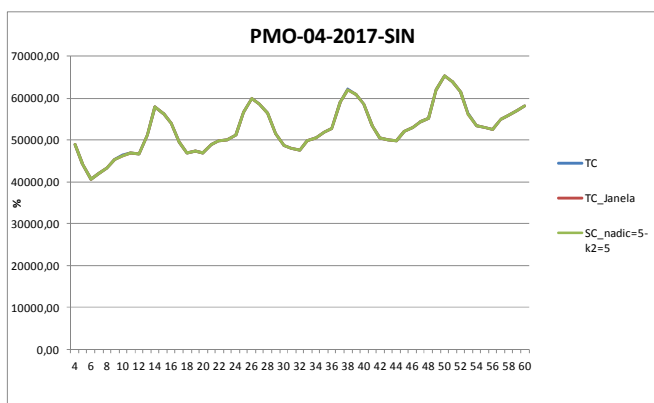


Figura 9.20 - Evolução da geração hidráulica total e do armazenamento médio do SIN ao longo do período de planejamento – PMO Abr 2017

PMO Mai 2017

As Figuras 8.16 e 8.17 ilustram a evolução do valor esperado dos custos marginais de operação e geração térmica ao longo do período de planejamento respectivamente, para os quatro subsistemas da configuração.

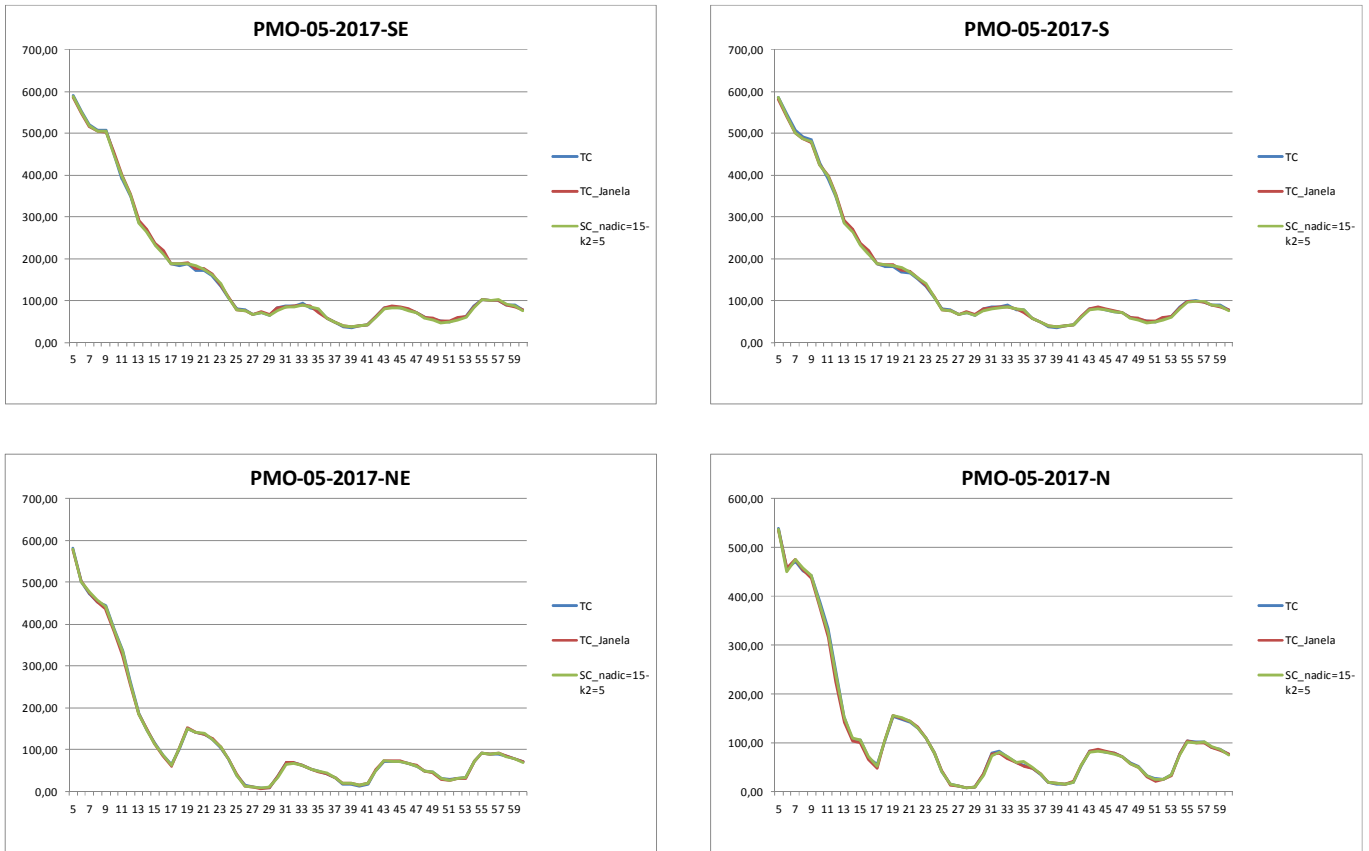
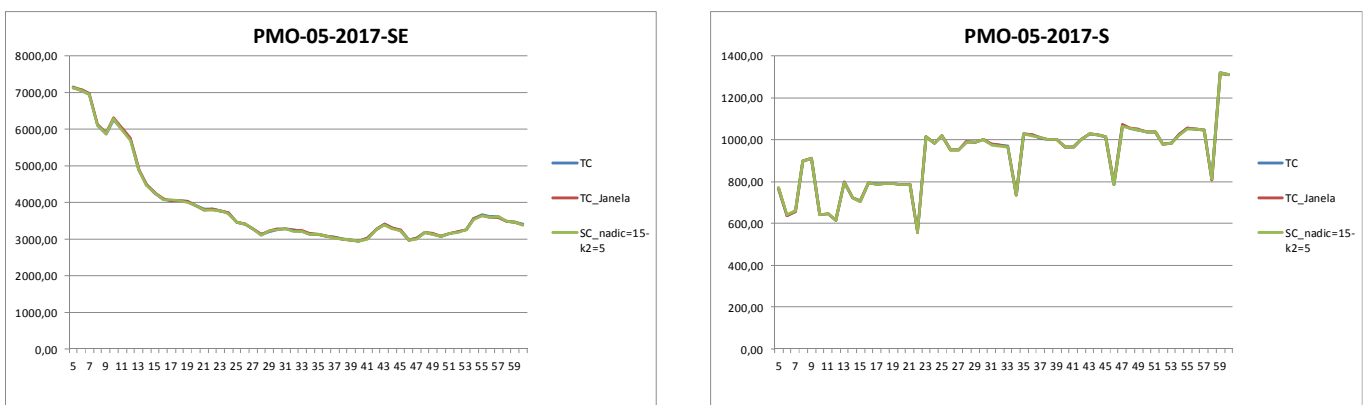


Figura 9.21 - Evolução dos CMOs médios ao longo do período de planejamento – PMO Mai 2017



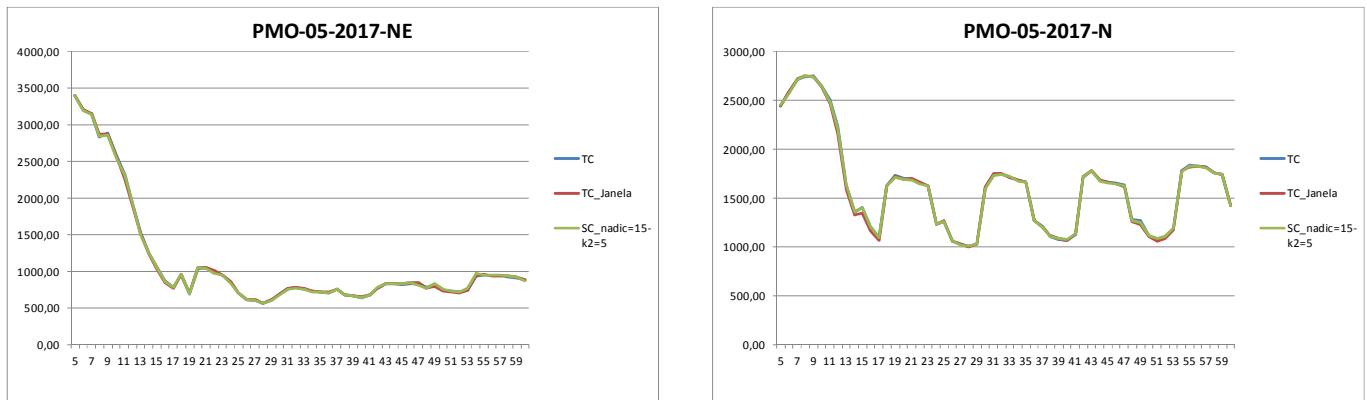
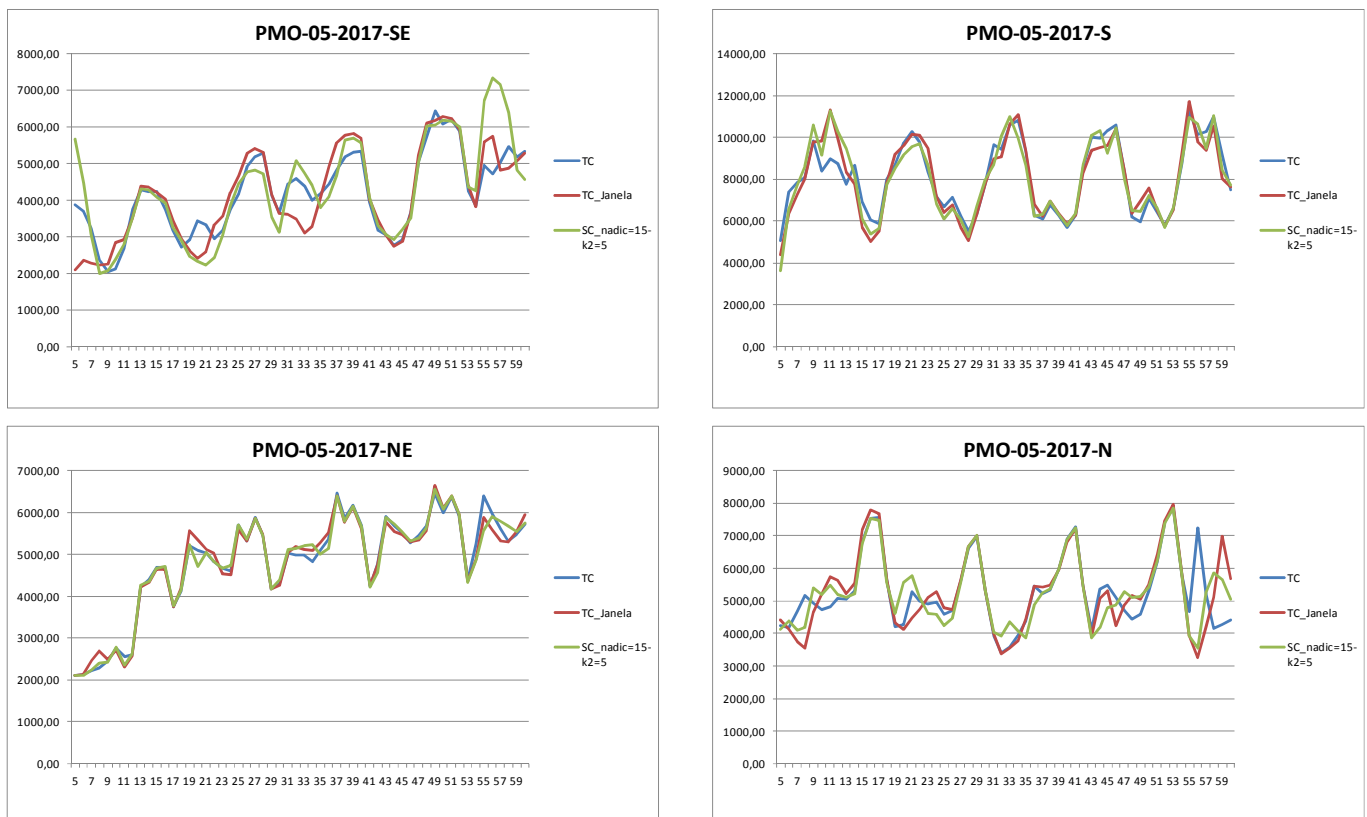


Figura 9.22 - Evolução da geração térmica média ao longo do período de planejamento – PMO Mai 2017

As Figuras 8.23 e 8.24 ilustram a evolução do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento respectivamente, para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



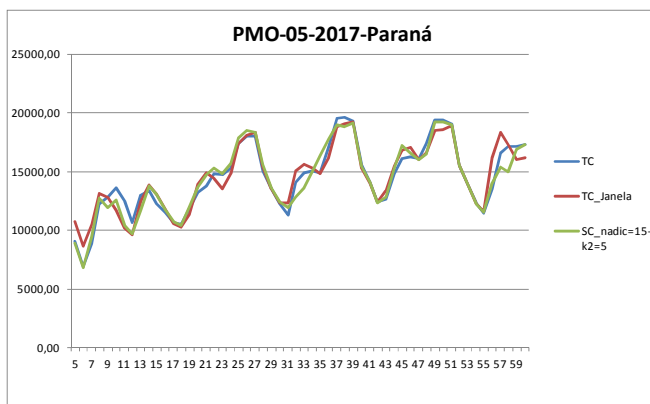
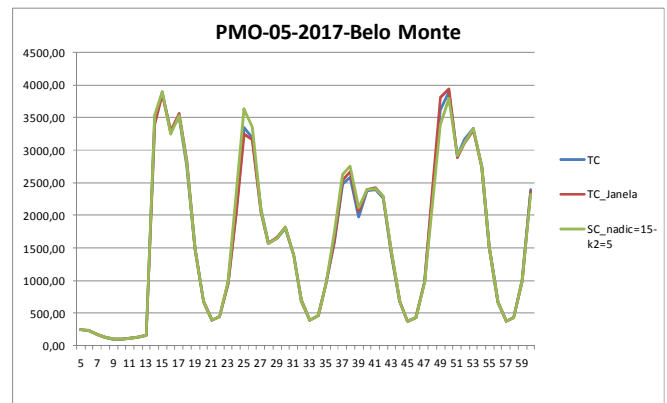
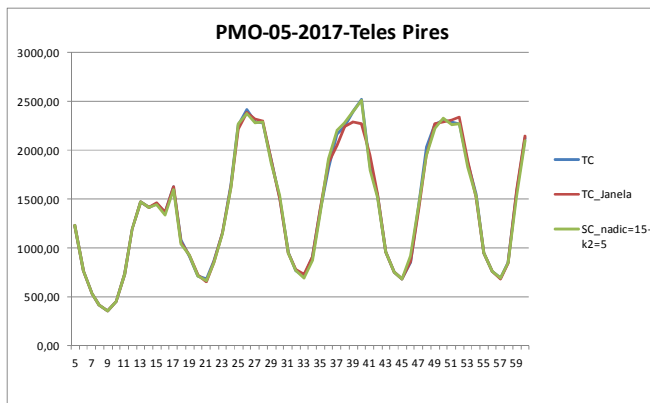
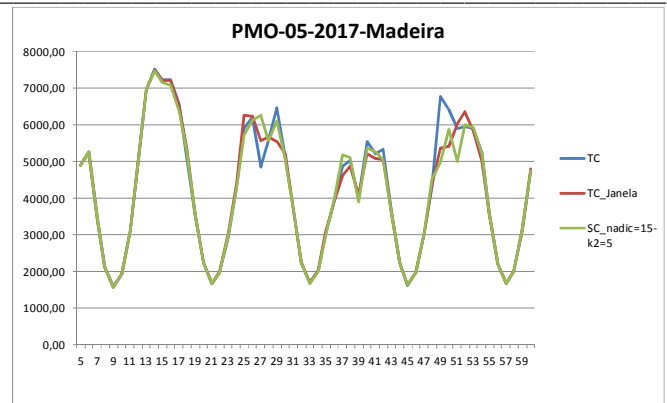
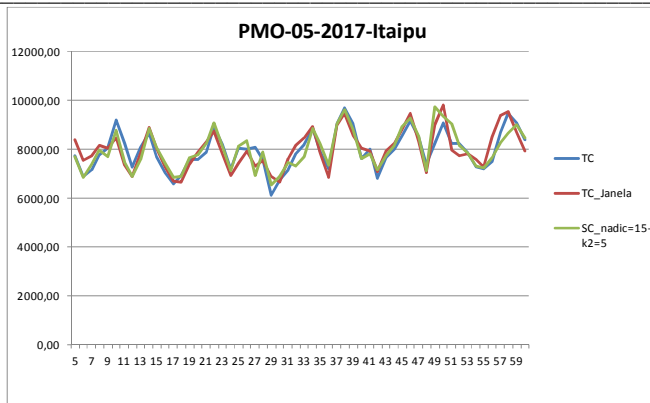
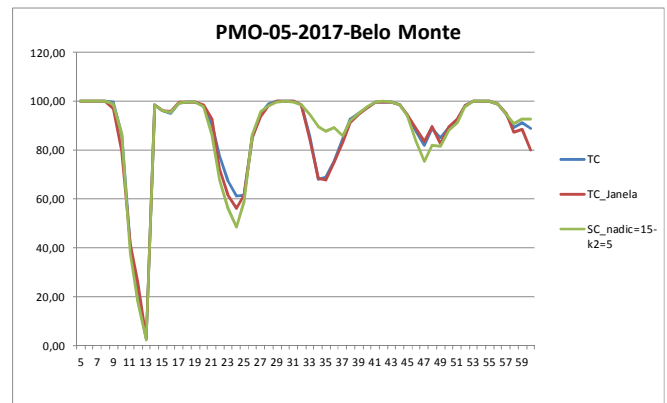
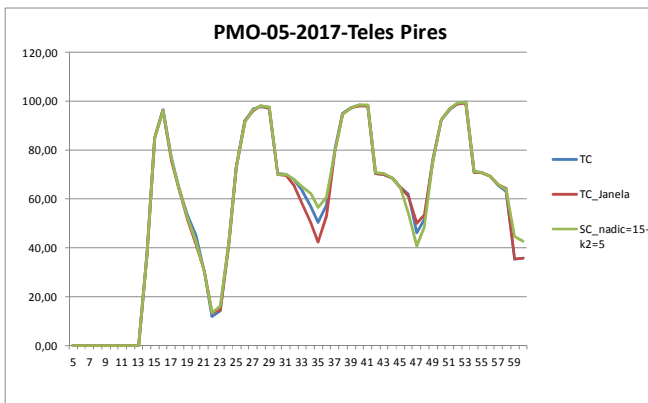
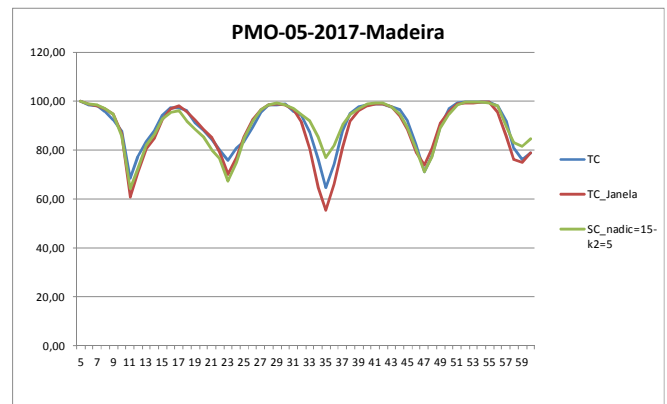
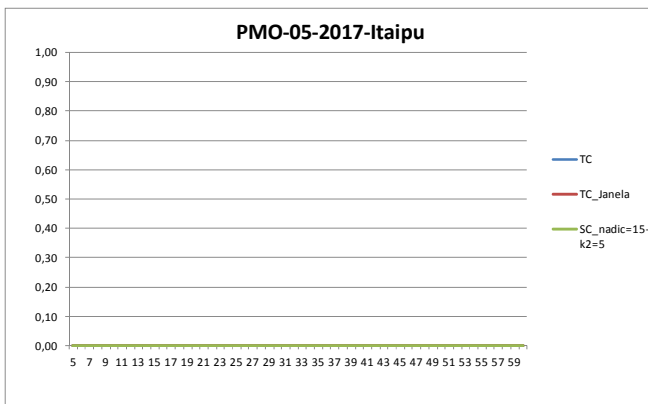
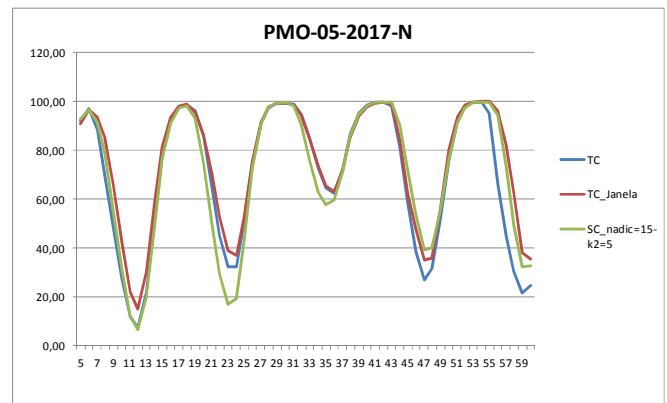
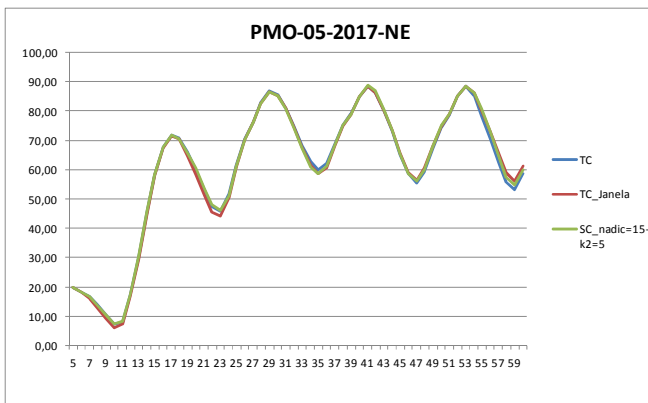
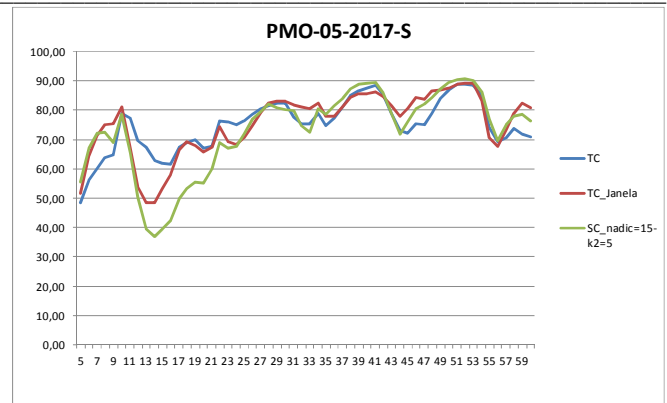
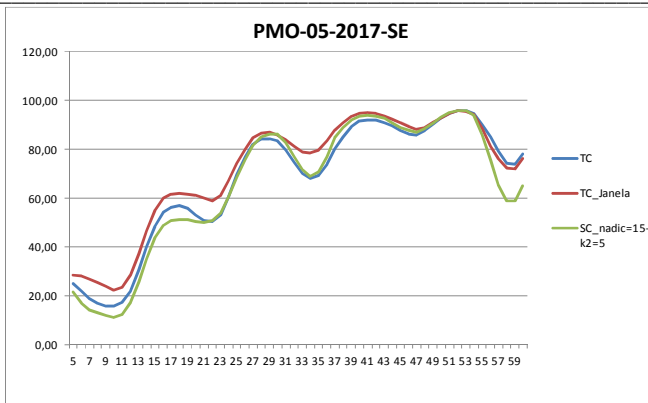


Figura 9.23 - Evolução da geração hidráulica média por REE ao longo do período de planejamento – PMO Mai 2017



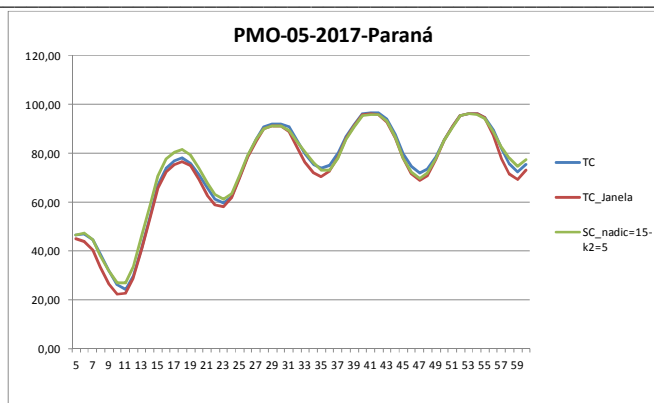


Figura 9.24 - Evolução do armazenamento médio por REE ao longo do período de planejamento – PMO Mai 2017

Estão ilustradas na Figura 8.25 as evoluções do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d'água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.

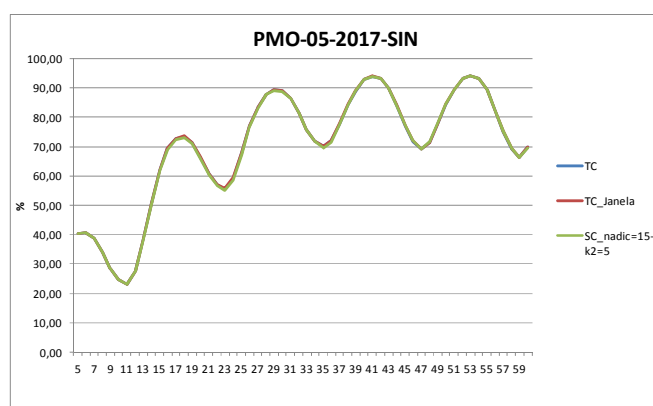
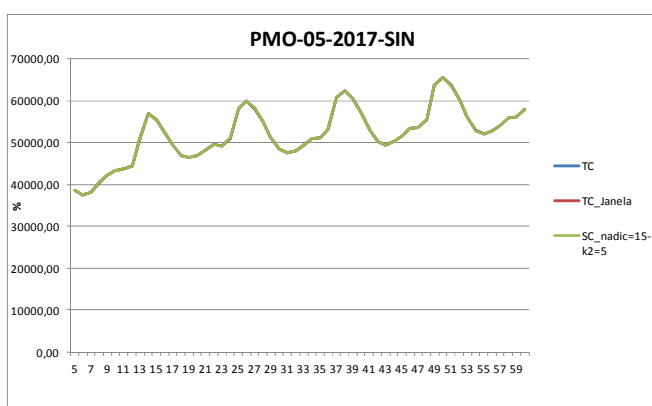
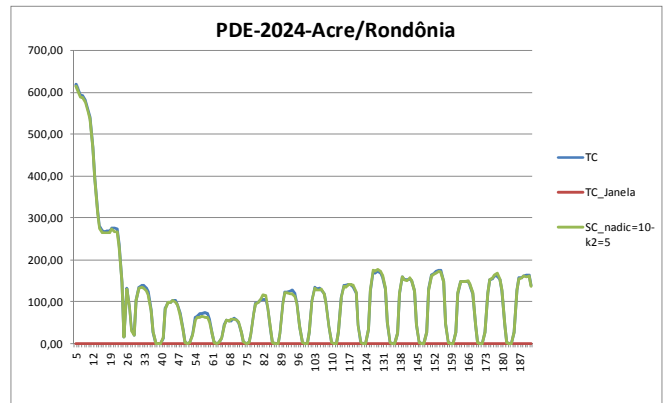
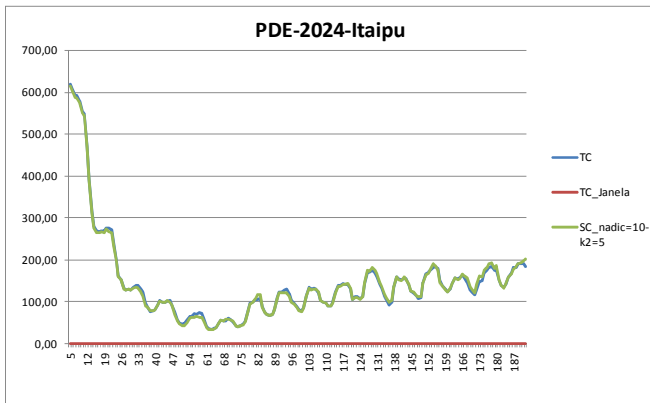
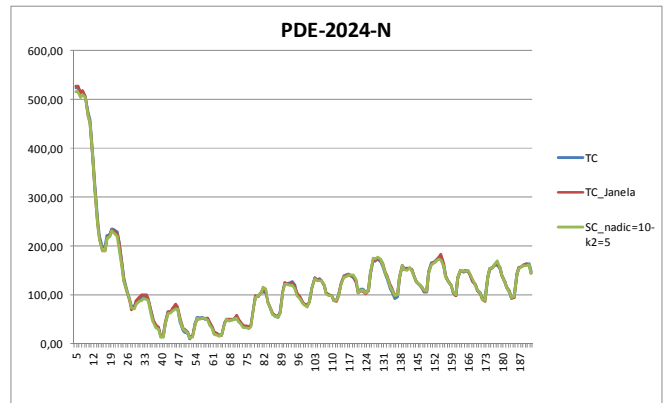
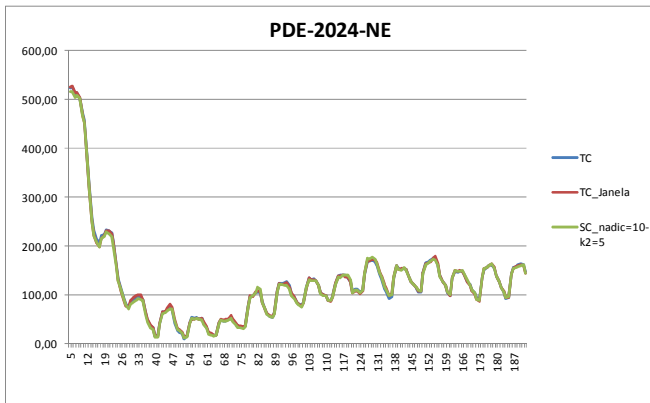
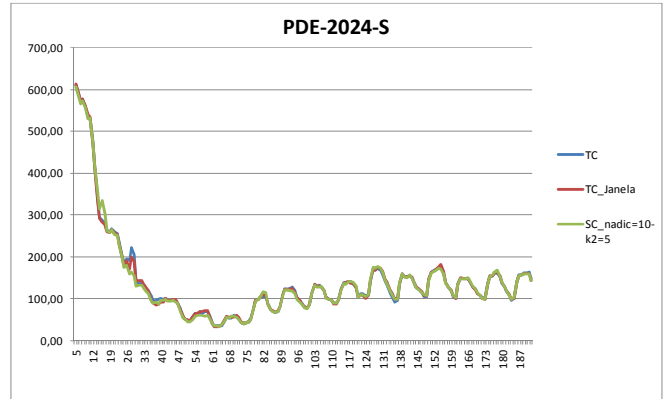
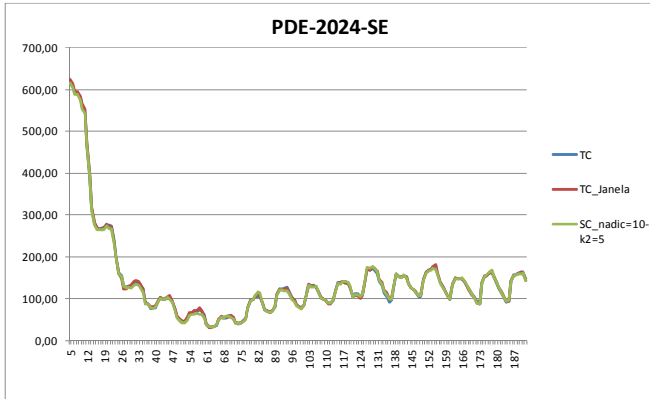


Figura 9.25 - Evolução da geração hidráulica total e do armazenamento médio do SIN ao longo do período de planejamento – PMO Mai 2017

PDE 2024

As Figuras 8.26 e 8.27 ilustram a evolução do valor esperado dos custos marginais de operação e geração térmica ao longo do período de planejamento respectivamente, para os dez subsistemas da configuração.



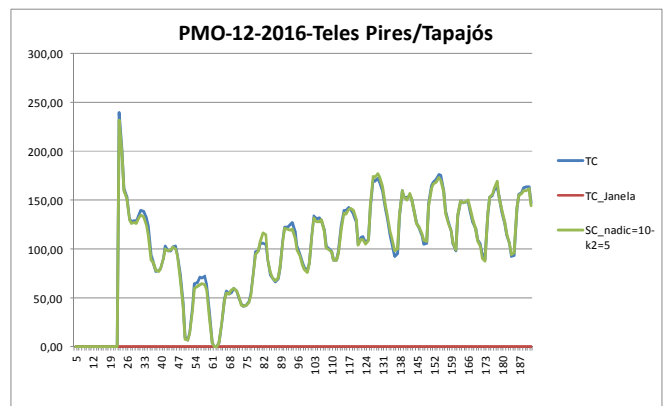
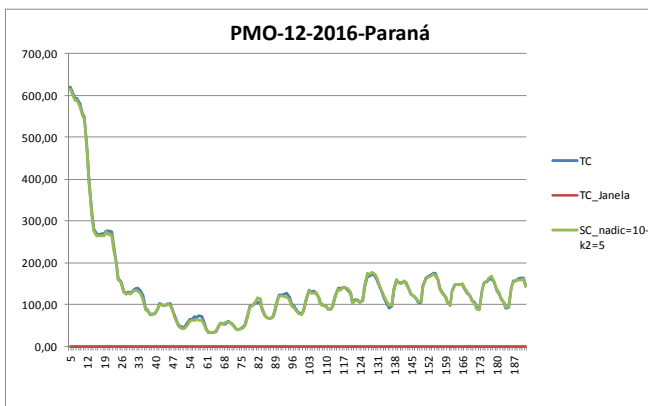
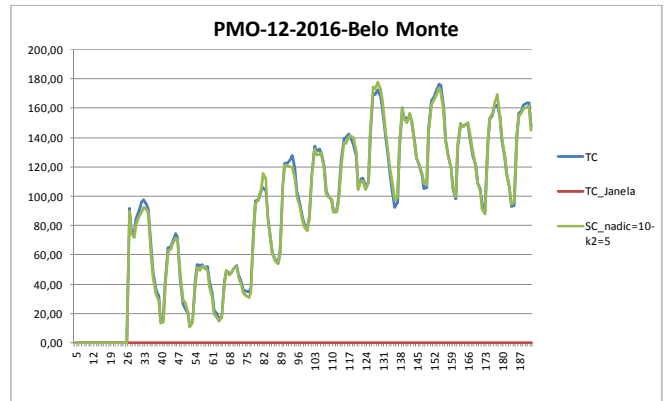
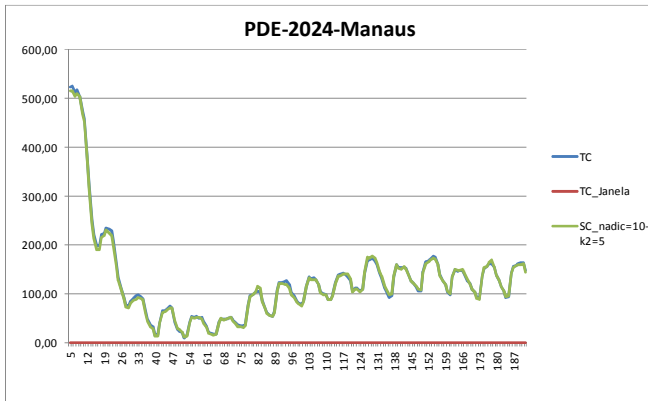
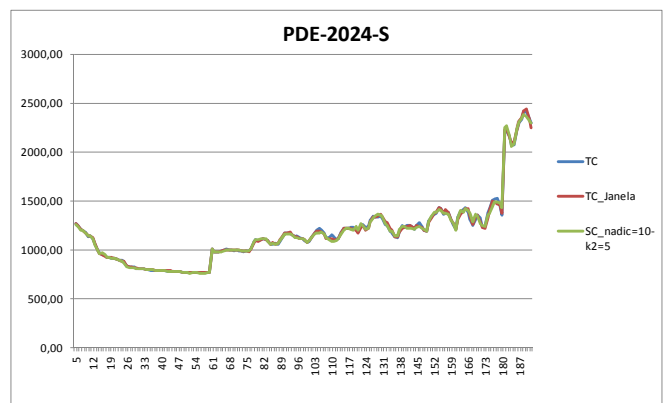
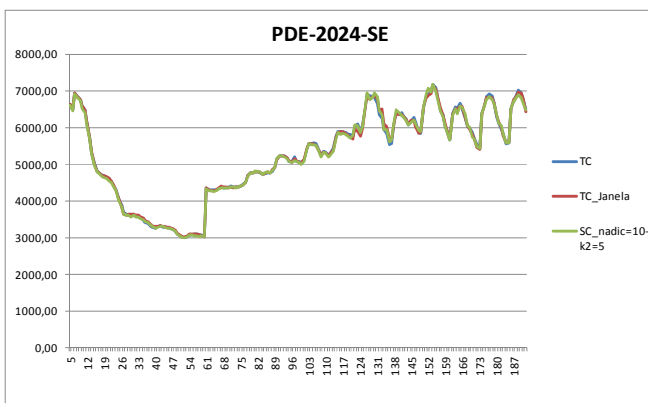
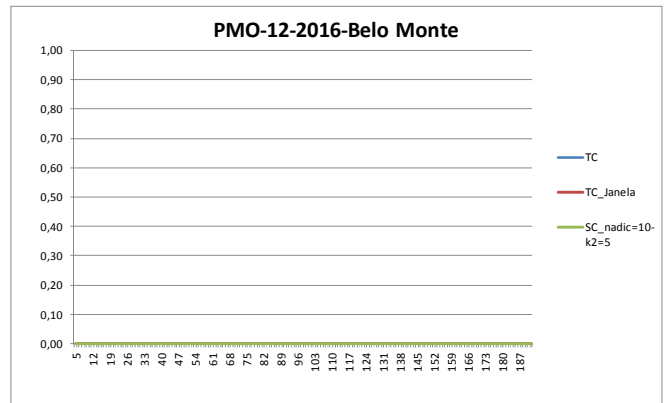
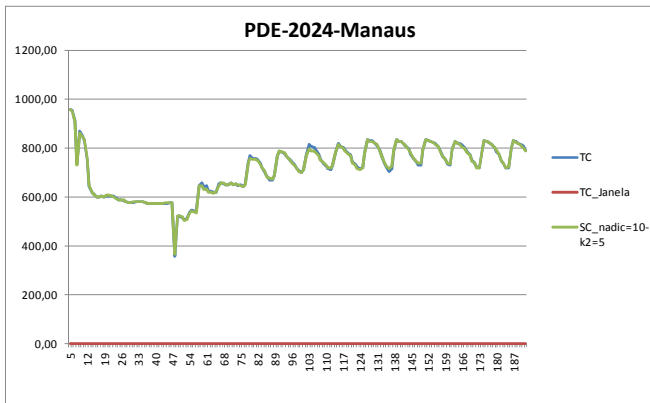
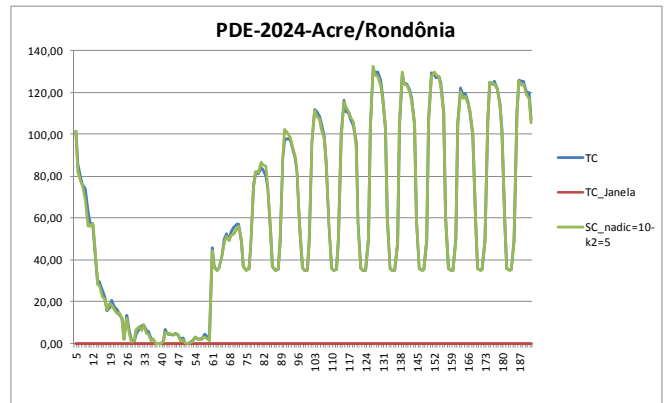
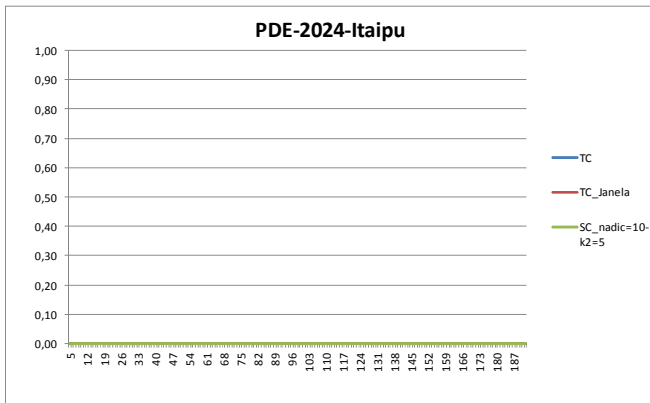
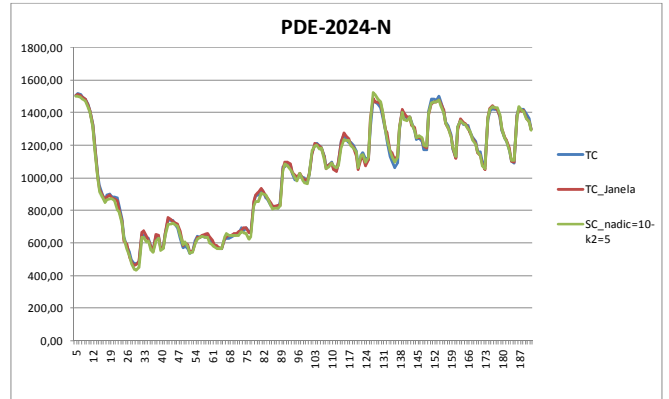
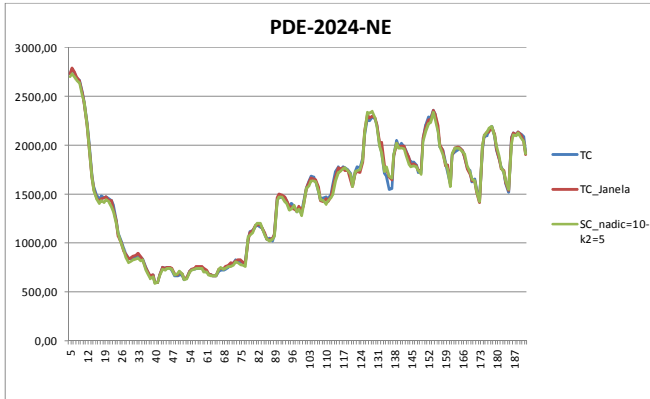


Figura 9.26 - Evolução dos CMOs médios ao longo do período de planejamento – PDE 2024





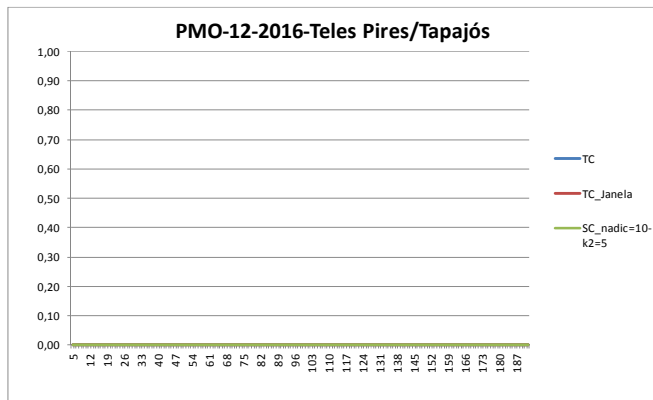
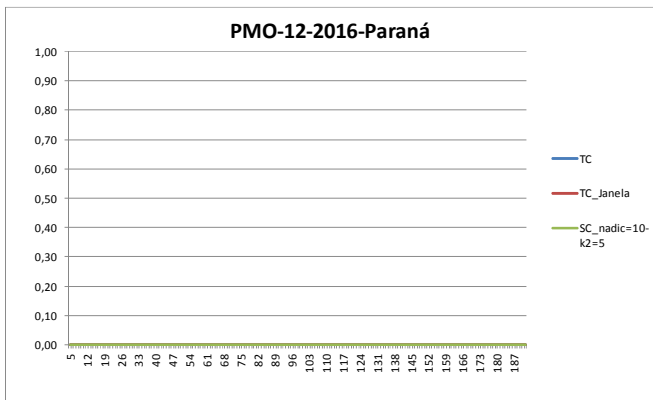
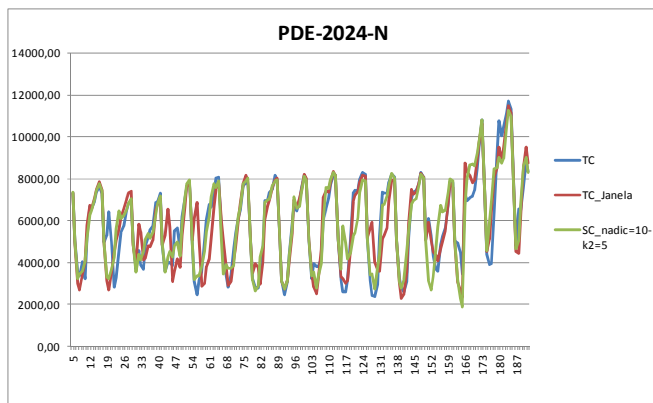
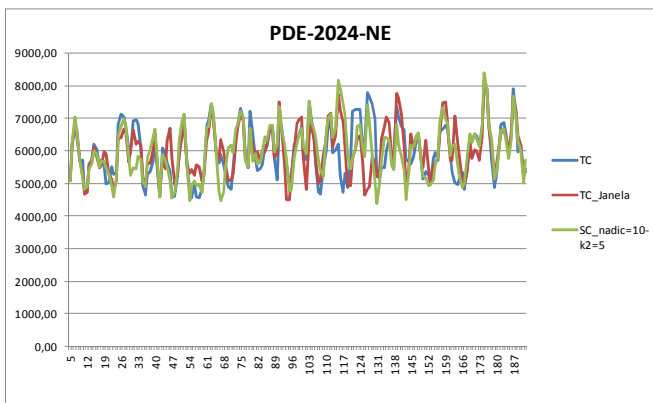
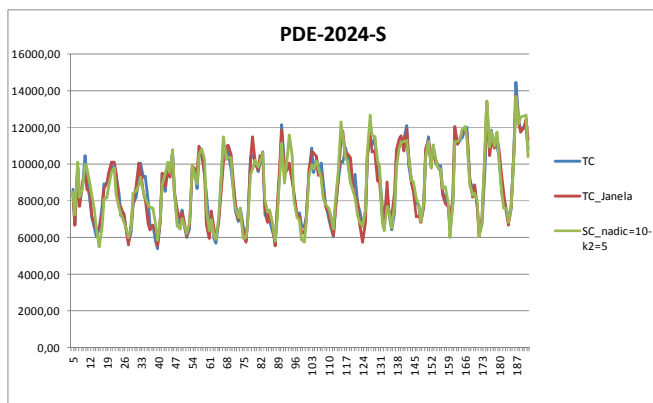
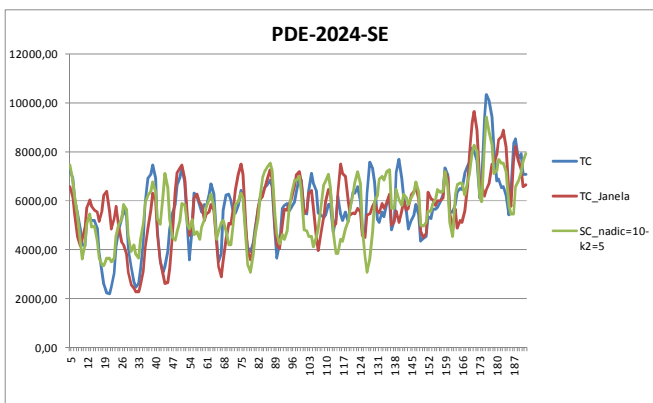


Figura 9.27 - Evolução da geração térmica média ao longo do período de planejamento – PDE 2024

As Figuras 8.28 e 8.29 ilustram a evolução do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d’água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento respectivamente, para os nove reservatórios equivalentes de energia da configuração.



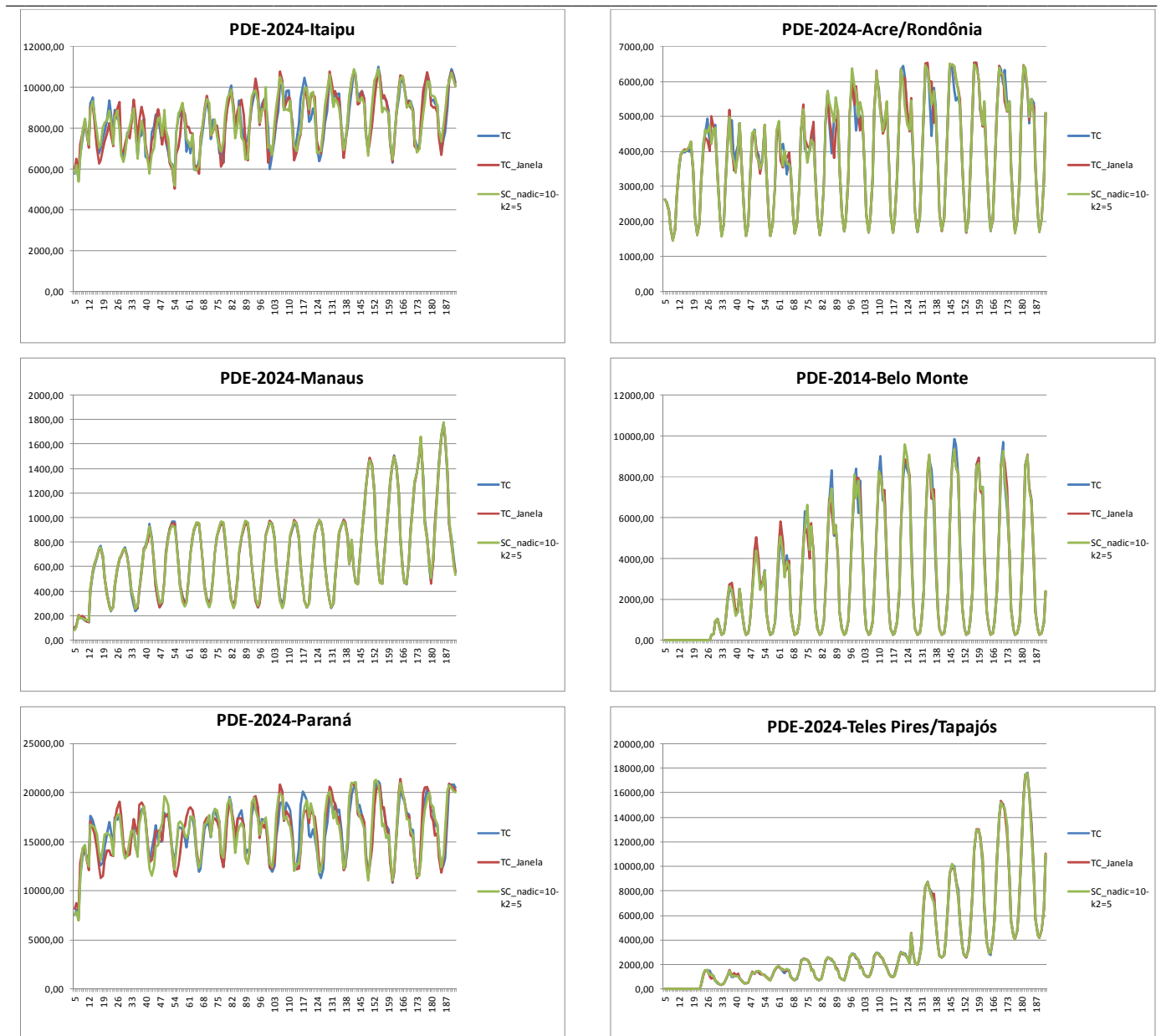
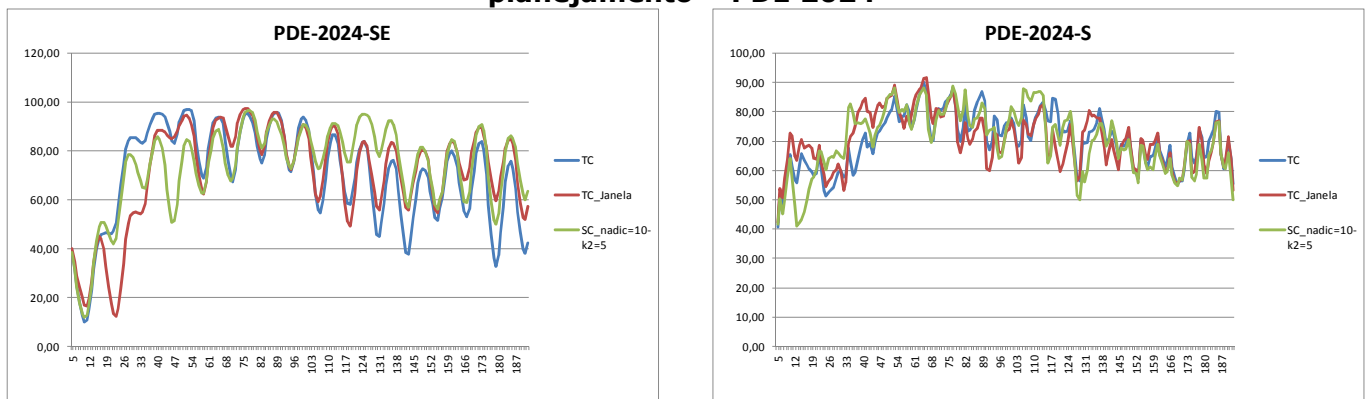


Figura 9.28 - Evolução da geração hidráulica média por REE ao longo do período de planejamento – PDE 2024



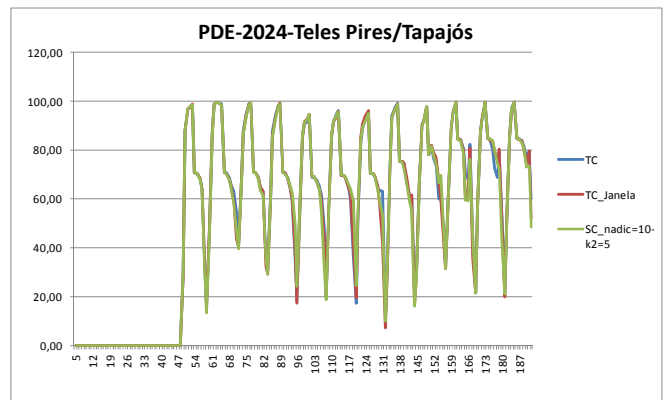
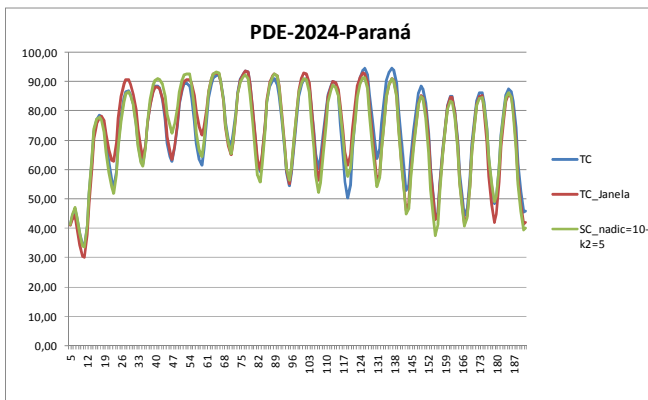
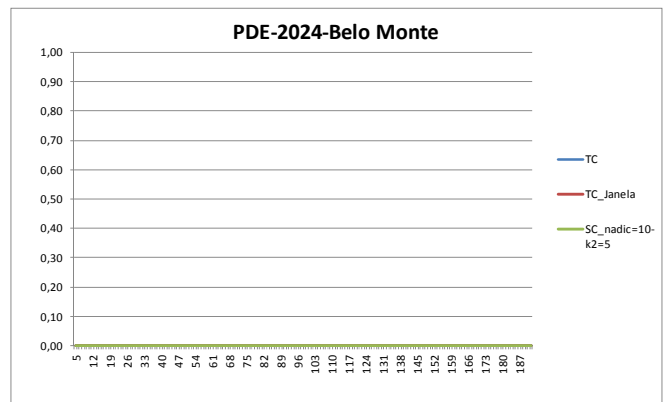
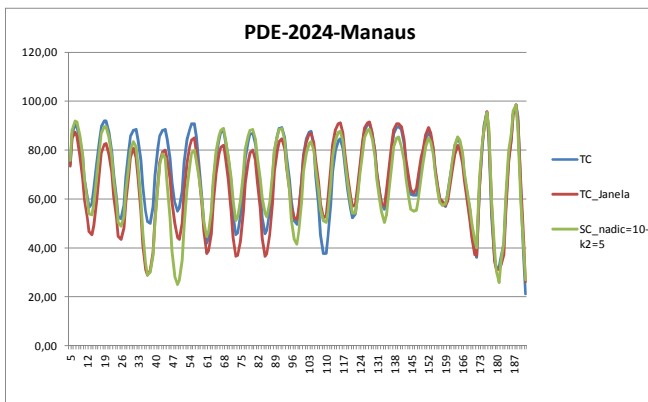
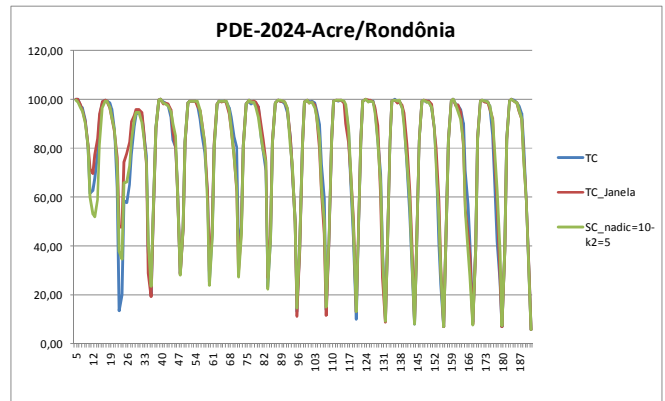
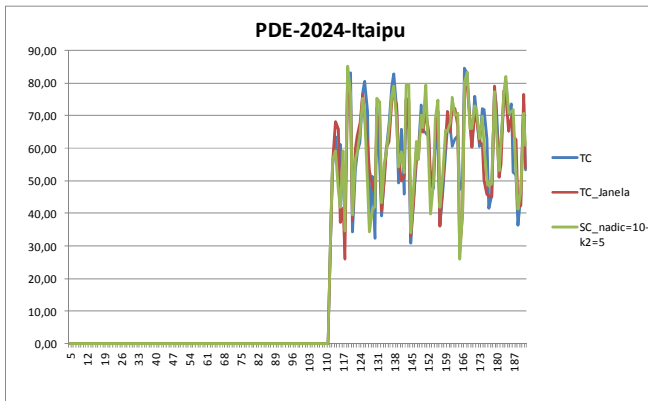
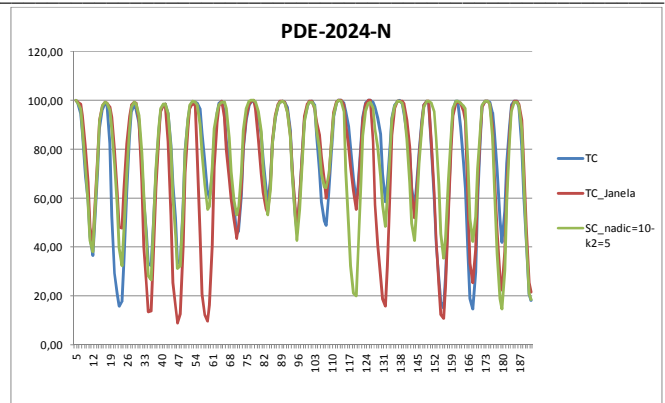
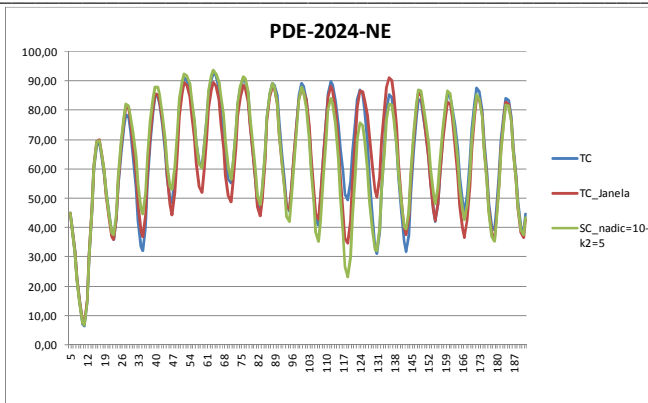


Figura 9.29 - Evolução do armazenamento médio por REE ao longo do período de planejamento – PDE 2024

Estão ilustradas na Figura 8.30 as evoluções do valor esperado da geração hidráulica, controlável e fio d'água, e do armazenamento ao longo do período de planejamento para os dez reservatórios equivalentes de energia da configuração.

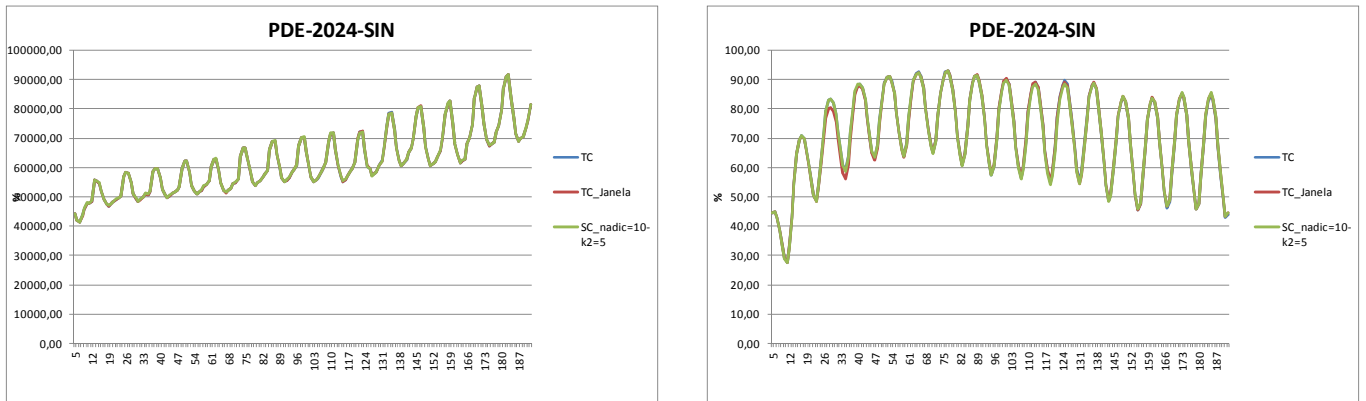


Figura 9.30 - Evolução da geração hidráulica total e do armazenamento médio do SIN ao longo do período de planejamento – PDE 2024