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

GT Metodologia

Representação Hidrológica:

Geração de cenários

Relatório Técnico do GT Metodologia da CPAMP – nº02-2021

Sumário

1. Introdução 3

1.1. Motivação 5

1.2. Resumo das contribuições à Consulta Pública nº 103 de 13/01/2021 relativas à atividade Representação Hidrológica 6

2. Sumário executivo 7

3. Metodologia proposta para implementação no ciclo 2019/2021 10

4. Avaliação de casos de garantia física 11

5. *Backtest* independente 17

5.1. Sensibilidades nos parâmetros do CVaR 18

5.2. Encadeamento NEWAVE/DECOMP: janeiro/2012 a dezembro/2015 19

6. Recomendações 25

7. Referências Bibliográficas 27

8. Anexos 28

Anexo A: Outros resultados das rodadas de *backtest* independente 28

1. Introdução

Este relatório está inserido no contexto do Grupo de Trabalho de Metodologia da CPAMP – Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico, criada pela Resolução CNPE nº 01/2007 e regulamentada pela Portaria MME n° 47/2008, com a finalidade de garantir coerência e integração das metodologias e programas computacionais utilizados pelo Ministério de Minas e Energia - MME, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS e Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE.

O Grupo de Trabalho de Metodologia da CPAMP é coordenado pela CCEE (representada pela Gerência Executiva de Preços, Modelos e Estudos Energéticos – GEPME) e conta com a participação do MME (representado pelas Secretarias de Energia Elétrica – SEE, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – SPE e Assessoria Econômica - Assec), da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (representada pela Superintendência de Regulação da Geração – SRG), da EPE (representada pela Assessoria da Presidência e Superintendência de Planejamento da Geração – SGE) e do ONS (representado pelas Gerências Executivas de Planejamento Energético – PE e de Programação – PR). O grupo possui, ainda, a assessoria técnica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (representado pelo Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente).

Ao longo do ciclo 2019/2020/2021 o Grupo de Trabalho de Metodologia da CPAMP, doravante denominado de GT Metodologia, avaliou seis subgrupos temáticos:

1. Volatilidade;
2. Produtibilidade;
3. Representação Hidrológica: Geração de Cenários;
4. Representação do Volume Mínimo Operativo no modelo DECOMP;
5. Elevação de Armazenamento;
6. Taxa de Desconto.

As propostas e estudos realizados pelos Subgrupos de Representação Hidrológica, Produtibilidade e Volatilidade foram objeto da Consulta Pública nº 103, de 08 de janeiro de 2021, finalizada em 22 de fevereiro de 2021. Nessa oportunidade, os

agentes puderam conhecer antecipadamente os estudos desenvolvidos pelo GT Metodologia.

O GT Metodologia não recomendou o uso do modelo NEWAVE que não considerava a Energia Natural Afluente (ENA) como variável de estado, trabalho este desenvolvido pelo Subgrupo de Volatilidade. Os detalhes sobre o trabalho estão contidos no Relatório Técnico que subsidiou a Consulta Pública (CP) do tema.

O Subgrupo de Produtibilidade avaliou a modelagem das perdas e da produtibilidade de forma variável na Função de Produção Hidrelétrica (FPH) no modelo DECOMP. As avaliações do tema continuarão ao longo do ciclo 2021/2022, visando aperfeiçoar a representação da FPH e são abordadas no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 03-2021.

Com relação ao Subgrupo de Representação Hidrológica, os estudos avaliaram o aperfeiçoamento metodológico do modelo de geração de cenários de afluências atualmente empregado - PAR(p), visando preservar a condição hidrológica recente por um maior período. O modelo proposto, denominado PAR(p)-A, foi desenvolvido pelo CEPEL e analisado pelo GT Metodologia, sendo as análises e resultados amplamente abordados no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-2020 e no presente documento.

O Subgrupo de Representação do Volume Mínimo Operativo (VMinOp) avaliou a representação dos níveis mínimos de armazenamento por Reservatório Equivalente de Energia (REE) no modelo DECOMP. A funcionalidade de Restrições Hidráulicas de Energia (RHE) foi empregada para este fim, as análises e resultados são apresentados no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 04-2021.

O Subgrupo de Elevação de Armazenamento abordou a atualização dos níveis meta usados na representação das restrições de volume mínimo operativo no modelo NEWAVE, e por recomendação do GT Metodologia também estarão representadas no modelo DECOMP. O Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 05-2021 detalha a escolha dos novos parâmetros e a metodologia empregada para este fim.

Por fim, o Subgrupo de Taxa de Desconto tratou da avaliação da taxa de desconto atualmente empregada no modelo NEWAVE. As avaliações do tema continuarão ao longo do ciclo 2021/2022, visando aperfeiçoar e identificar qual será o melhor índice ou taxa de referência que dever ser empregado nos estudos de planejamento da operação

e da expansão e no cálculo preço de curto prazo. Os estudos desenvolvidos ao longo do ciclo de trabalho são apresentados no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 01-2021.

Considerando as recomendações do GT Metodologia de uso das funcionalidades acima detalhadas, o Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 06-2021 apresentará a avaliação de reparametrização do mecanismo de aversão a risco, Valor Condicionado a um Dado Risco - CVaR com parâmetros alfa (α) e lambda (λ).

1.1. Motivação

O tema relacionado à geração de cenários de vazões naturais em usinas hidrelétricas que compõem o Sistema Interligado Nacional vem sendo abordado e incentivado pela CPAMP nos últimos anos. Em outubro/2017 o GT Met coordenou um *workshop* com os agentes denominado "Alterações de padrões climáticos e hidrológicos e avaliação da melhor representação energética de séries de vazões naturais", ocasião em que agentes, instituições e universidades tiveram a oportunidade de apresentar e discutir sobre a não estacionariedade das séries históricas e seus efeitos no setor elétrico. Em dezembro do mesmo ano, a atividade relacionada à geração de cenários foi elencada dentre as prioritárias para o ciclo 2018/2019, quando se investigaram possíveis relações das referidas anomalias com a variabilidade de índices climáticos e avaliaram-se eventuais impactos à operação/planejamento caso o histórico atualmente empregado nas modelagens (1931-atual) fosse alterado. Os estudos estão descritos no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 05-2019. Na ocasião, um dos desdobramentos das recomendações foi o enquadramento do tema no Projeto de Assistência Técnica (META) celebrado entre o governo brasileiro e o Banco Mundial.

Em continuidade a este trabalho e destacando a importância dos estudos para o setor elétrico, a macroatividade Representação Hidrológica: Geração de Cenários foi mantida como prioritária no ciclo 2019/2020. Em reuniões plenárias realizadas em março e abril de 2020, considerando o contexto da pandemia do COVID-19, a CPAMP prorrogou suas atividades, estabelecendo como pauta única para o ciclo de 2019/2020 a implementação do preço horário. Na Nota Informativa disponibilizada no site do MME, destacou-se que os demais aprimoramentos metodológicos previstos no cronograma de

atividades do GT Met para o ciclo 2019/2020 continuariam a ser desenvolvidos sem que as propostas fossem submetidas à aprovação para adoção em 2021. Dessa forma, os cronogramas, dentre os quais inclui-se a atividade Representação Hidrológica, foram estendidos para o ciclo de trabalho 2020/2021.

Os estudos realizados objetivaram o aperfeiçoamento metodológico do modelo de geração de cenários de afluências atualmente empregado - PAR(p), visando preservar a condição hidrológica recente por um período de tempo maior. O modelo proposto, denominado PAR(p)-A, foi desenvolvido pelo CEPEL e analisado pelo GT Met, sendo as análises e resultados amplamente abordados no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-2020. A atividade foi, então, objeto da Consulta Pública relativa aos temas de Volatilidade do CMO/PLD, Representação Hidrológica e Produtibilidade Hidroelétrica (Nº 103 de 13/01/2021), que esteve aberta para contribuições entre os dias 13/01/2021 e 26/02/2021.

1.2. Resumo das contribuições à Consulta Pública nº 103 de 13/01/2021 relativas à atividade Representação Hidrológica

Abaixo são listadas as principais contribuições à Consulta Pública nº 103, relacionadas à metodologia PAR(p)-A. Em resumo, os agentes se mostraram de acordo como as conclusões do Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-2020 acerca da melhor representatividade hidrológica da metodologia proposta, indicando pontos de atenção relacionados aos *backtests* a serem apresentados para a 2ª Consulta Pública:

1. A metodologia proposta indica uma melhor representatividade dos cenários de ENA;
2. A reavaliação dos parâmetros de aversão a risco não deve eliminar ou reduzir os ganhos dos resultados advindos dos aperfeiçoamentos metodológicos, como verificado ao se aplicar a metodologia do PAR(p)-A. Deve-se buscar nos modelos despachos térmicos por ordem de mérito de acordo com as necessidades operativas reais do SIN, de modo a evitar ao máximo possível operações heterodoxas; e

3. É importante que os *backtests* incluam períodos de escassez e excedentes hidroenergéticos.

Baseado nesses encaminhamentos, o presente documento aborda prioritariamente os resultados de *backtests* exclusivamente para a atividade Representação Hidrológica, a fim de se verificar isoladamente os eventuais impactos do uso da metodologia do PAR(p)-A. A análise dos *backtests* incorporando também as demais implementações estudadas pelo GT Met são apresentadas no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 06-2021.

Na sequência, por sua vez, são evidenciadas as principais sugestões dos agentes relacionadas à continuidade da atividade Representação Hidrológica:

1. Simular diferentes horizontes da parcela da hidrologia recente (6 meses, 2 anos e outros) de forma a buscar sensibilidades do seu comportamento e, assim, evitar que possíveis cenários sejam desconsiderados; e
2. Analisar com maior detalhamento a permanência/estacionariedade das séries de vazões, visto que o uso do solo, o regime de precipitações nas bacias hidrográficas e outras variáveis climatológicas podem afetar as vazões médias ao longo dos anos.

Quanto ao primeiro item, entende-se que o aprimoramento é importante e será encaminhado ao Cepel para implementação da flexibilização do número de meses a ser considerado na parcela do PAR(p)-A, atualmente fixada em 12 meses (parcela anual).

Relacionado ao 2º item, ressalta-se que a abordagem que relaciona as séries históricas de vazões/ENAs com eventos climáticos foi uma das recomendações do Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 05-2019, resultante dos estudos do ciclo 2018/2019, o qual foi enquadrado no Projeto de Assistência Técnica (META) celebrado entre o governo brasileiro e o Banco Mundial, sob o título “Variabilidade climática e sua influência no comportamento das séries de vazões e variáveis meteorológicas”.

2. Sumário executivo

Esta seção apresenta um resumo das conclusões e recomendações do GT Met acerca dos estudos de Representação Hidrológica realizados no ciclo atual.

Conforme exposto no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-2020, a metodologia de aperfeiçoamento do modelo GEVAZP, denominada PAR(p)-A, traz melhorias importantes para a representação da hidrologia recente na geração de cenários de vazões e de Energias Naturais Afluentes (ENAs). Constatou-se, ainda, que o modelo proposto tende a gerar cenários continuamente mais severos (positivos e negativos) ao longo do horizonte estudado, em comparação ao modelo vigente (PAR(p)). Destaca-se também que testes estatísticos formais indicaram que o PAR(p)-A reproduz as caraterísticas do histórico de ENAs e que tem ganhos quando comparado com o PAR(p).

Dada a melhor representatividade hidrológica nos cenários gerados pelo PAR(p)-A observou-se uma modificação no comportamento das principais variáveis operativas, tornando importante reavaliar a percepção de risco do setor frente a este novo comportamento. A reavaliação dos parâmetros do mecanismo de aversão a risco CVaR, em conjunto com a adoção das demais metodologias estudadas neste ciclo de trabalho do GT-Metodologia, está descrita no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 06-2021.

O presente documento apresenta os resultados da simulação encadeada dos modelos NEWAVE/DECOMP para o período de 2012 a 2015. Os resultados são sintetizados na

Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das conclusões do *backtest* e desenvolvimentos futuros indicados acerca da consideração da metodologia PAR(p)-A.

Conclusões do *backtest*
O caso PAR(p)-A / CVaR (50,35) elevou o despacho térmico e, consequentemente, o CMO/PLD o e armazenamento no SIN na maioria das semanas, quando comparado ao caso Vigente (PAR(p) / CVaR (50,35)). Com isso, evidencia-se o efeito da metodologia PAR(p)-A nos modelos computacionais, tornando-os mais avessos a risco.
O caso PAR(p)-A / CVaR (50,20) reduziu o CMO/PLD em relação aos casos Vigente e caso PAR(p)-A / CVaR (50,35), bem como a geração térmica e o armazenamento. Portanto, essa sensibilidade no CVaR impactou mais nos resultados do que as possíveis respostas do modelo aos cenários mais severos de vazões/ENAs ao empregar a metodologia PAR(p)-A.
No caso PAR(p)-A / sem CVaR houve redução no armazenamento do SIN em relação aos demais casos. Comparando com o Vigente, em novembro/2014 e novembro/2015 essa diferença alcançou valores superiores a 15% EArm máximo.
Desenvolvimentos futuros
Incluir nos relatórios e/ou manuais de metodologia como é considerada a mudança de configuração durante o ajuste do modelo ao se considerar o PAR(p)-A.
Incluir nos relatórios e/ou metodologia de usuário como é realizada a redução automática da ordem ao se considerar o PAR(p)-A.
Definir um critério de significância do coeficiente *psi* (ψ) para consideração da parcela anual na geração de cenários pelo modelo PAR(p)-A.
Aplicar o mesmo processo de derivação da FACP (função de autocorrelação parcial) do PAR(p)-A à FACP do modelo PAR(p).
Aprimoramento das versões dos modelos GEVAZP e NEWAVE de forma a permitir a simulação de diferentes horizontes da parcela da hidrologia recente (6 meses, 2 anos e outros).

3. Metodologia proposta para implementação no ciclo 2019/2021

Atualmente, o modelo GEVAZP, que utiliza a metodologia PAR(p), é responsável pela geração de cenários de vazões naturais afluentes no modelo DECOMP e de Energia Natural Afluente (ENA) no modelo NEWAVE. Analisando as séries sintéticas geradas por este modelo, verifica-se que ele nem sempre consegue reproduzir cenários que considerem essa persistência da tendência hidrológica recente, conforme tem-se observado que a média dos cenários gerados pelo PAR(p) retorna à MLT após alguns poucos períodos.

Visando evoluir a representação hidrológica na geração dos cenários pelo modelo GEVAZP, motivados pelas discussões contínuas do GT Met acerca do assunto, o CEPEL propôs uma nova metodologia de geração de cenários, intitulada PAR(p)-A (Modelo Auto-Regressivo Periódico Anual). As formulações, novo processo de cálculo

dos coeficientes e da geração de cenários, análises da metodologia e resultados dos modelos foram apresentados detalhadamente no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-2020 e Anexos A e B (estes últimos referentes aos relatórios do Cepel, disponíveis em http://srvlumis02.cepel.br/pt_br/sala-de-imprensa/noticias/documentacao-tecnica-das-metodologias-e-modelos-de-otimizacao-energetica-do-cepel.htm), os quais recomendamos a leitura para ampla compreensão do tema.

Complementarmente, o CEPEL realizou análises estatísticas detalhadas acerca da metodologia proposta, apresentadas no relatório "Testes Estatísticos para Avaliação de Aderência entre Séries Históricas de Energias Naturais Afluentes ao SIN e Cenários Sintéticos dos modelos PAR(p) e PAR(p)-A" (nº 1274/2021), que também pode ser consultado no site da instituição.

Em paralelo, foi realizada uma análise adicional do comportamento do modelo NEWAVE, ao se avaliarem os resultados nos períodos pré e pós estudo nos casos de garantia física, como complemento ao relatório da Consulta Pública nº 103 de 13/01/2021.

4. Avaliação de casos de garantia física

Foi observado um aumento significativo de CMO nos casos de cálculo de garantia física com o uso do PAR(p)-A, tanto em termos de CMO médio do período de estudo, quanto no $CVaR_{10\%}$(CMO), ambas as medidas usadas na convergência da carga crítica desse tipo de caso de acordo com os critérios de suprimento vigentes. As figuras a seguir mostram os valores obtidos para o caso de cálculo de garantia física da UHE Itumbiara.

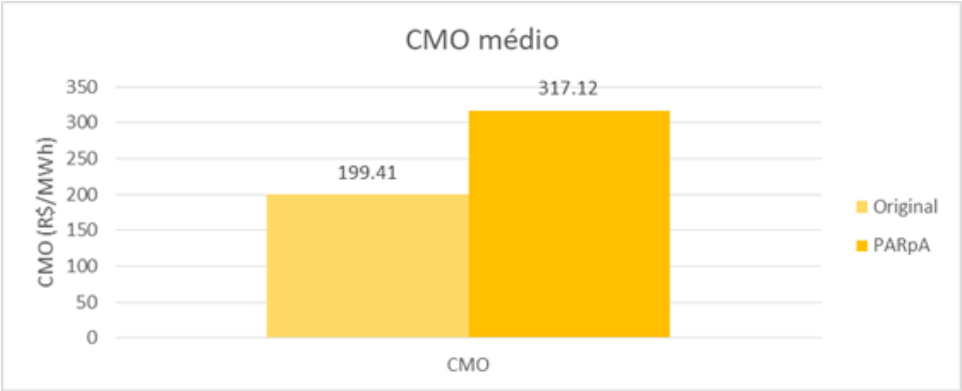


Figura 1 – CMO Médio do período de estudo, considerando as metodologias PAR(p) (Original) e PAR(p)-A.

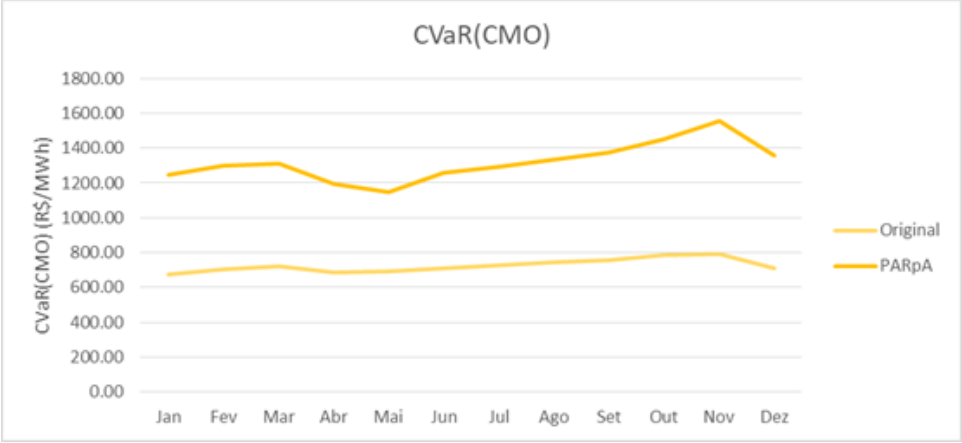


Figura 2 – $CVaR_{10\%}$ do CMO agregando os cenários dos 5 anos do período de estudo para cada mês para as metodologias PAR(p) (Original) e PAR(p)-A.

Dado o aumento observado no CMO médio, que é proporcionalmente maior do que o verificado em casos de PMO/PLD, buscou-se avaliar qual a justificativa para tal comportamento e como ele está relacionada ao uso do PAR(p)-A. Ressalta-se que o caso de garantia física possui diferenças em relação aos outros decks: considera armazenamento inicial dos reservatórios igual a 100%, usa período pré estudo, não tem restrições de intercâmbio, não usa tendência hidrológica (faz-se uma "pré geração de cenários" partindo da MLT por diversos períodos. O final dessa geração é usado no primeiro período pré), dentre outros.

Foram realizadas, então, duas sensibilidades: casos com tendência hidrológica de 100% da MLT e casos sem período pré estudo. Os gráficos abaixo mostram a

sensibilidade considerando uma tendência hidrológica igual à MLT. Os casos com PAR(p) estão representados com tons suaves e os casos com PAR(p)-A com tons vivos.

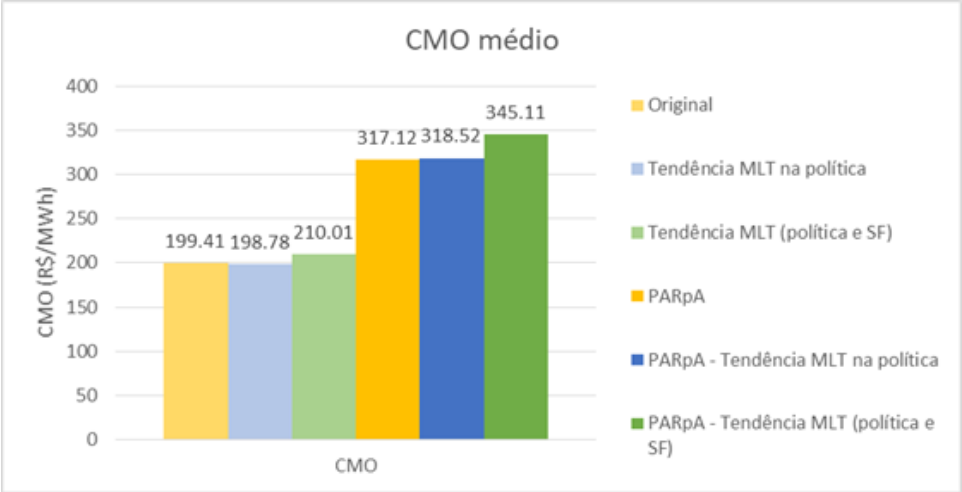


Figura 3 – CMO médio considerando o PAR(p) (Original, em amarelo claro), PAR(p) com tendência hidrológica igual a MLT na construção da política (azul claro), PAR(p) com tendência hidrológica igual a MLT na construção da política e na simulação final (verde claro) e os casos com PAR(p)-A com tons mais vivos.

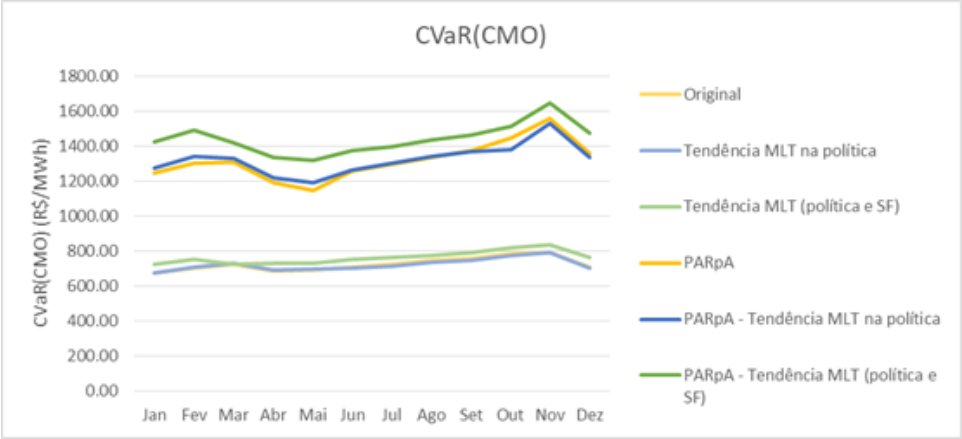


Figura 4 – $CVaR_{10\%}$ do CMO agregando os cenários dos 5 anos do período de estudo para cada mês para as metodologias PAR(p) (Original, tons suaves) e PAR(p)-A (tons vivos) variando o uso da tendência hidrológica.

Observa-se, tanto entre os casos com PAR(p) quanto aqueles com PAR(p)-A, pouca alteração nos resultados quando se considera a tendência hidrológica de 100% da MLT, seja apenas na política, seja na política e na simulação final. Qualquer que seja a forma de consideração da tendência hidrológica, introduzir o PAR(p)-A altera de maneira semelhante ao CMO e ao $CVaR_{10\%}$(CMO).

A segunda análise trata da consideração ou não de um período pré estudo.

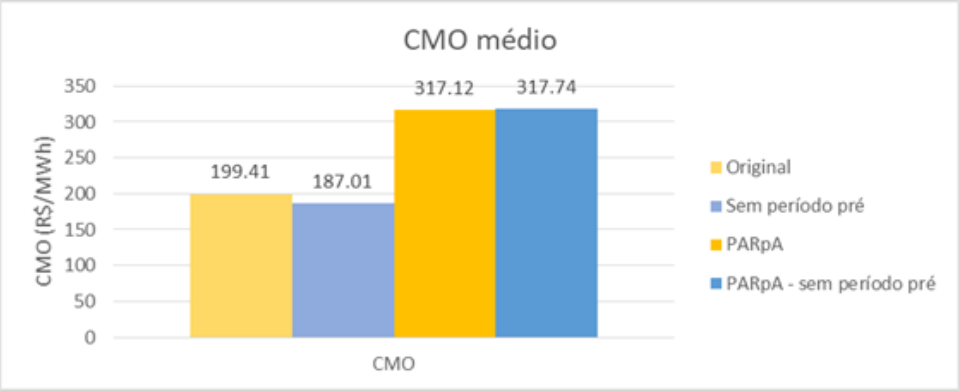


Figura 5 – CMO médio dos casos com período pré (amarelos) e os casos sem pré (azuis), com PAR(p) (tons suaves) e com o PAR(p)-A (tons vivos).

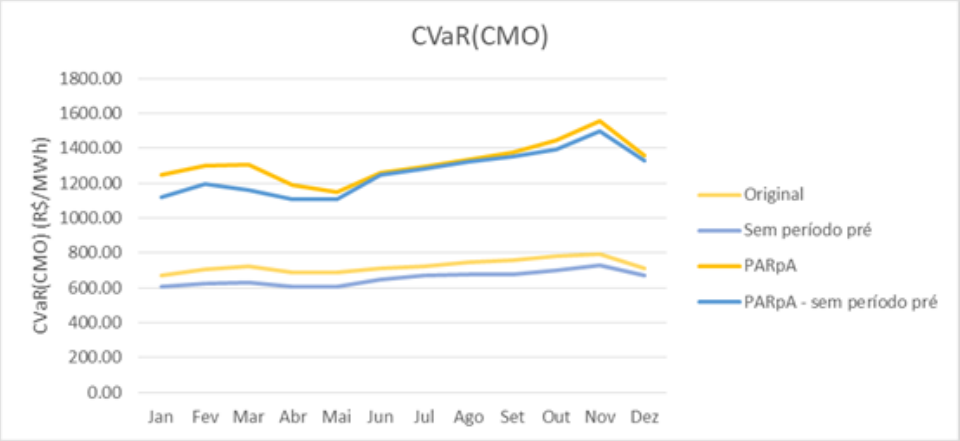


Figura 6 – $CVaR_{10\%}$ dos casos com período pré (amarelos) e os casos sem pré (azuis), com PAR(p) (tons suaves) e com o PAR(p)-A (tons vivos).

Nota-se que, usando PAR(p) ou PAR(p)-A, a retirada do período pré proporciona uma pequena redução do CMO médio e do $CVaR_{10\%}$(CMO).Diante do exposto, concluiu-se, através dos resultados das simulações, que essas duas características exclusivas dos casos de garantia física não levam a um comportamento diferenciado quando se utiliza o PAR(p)-A.

Avaliou-se, então, o efeito da proporção entre oferta e demandado caso. Além da carga original do caso, foram avaliadas a carga de 2025 do PDE 2030 e duas cargas intermediárias.

O gráfico a seguir mostra o CMO médio de cada caso analisado. Observa-se que, quanto maior a carga, maior o CMO médio, e que, dada uma carga, o CMO médio aumenta com a introdução do PAR(p)-A.

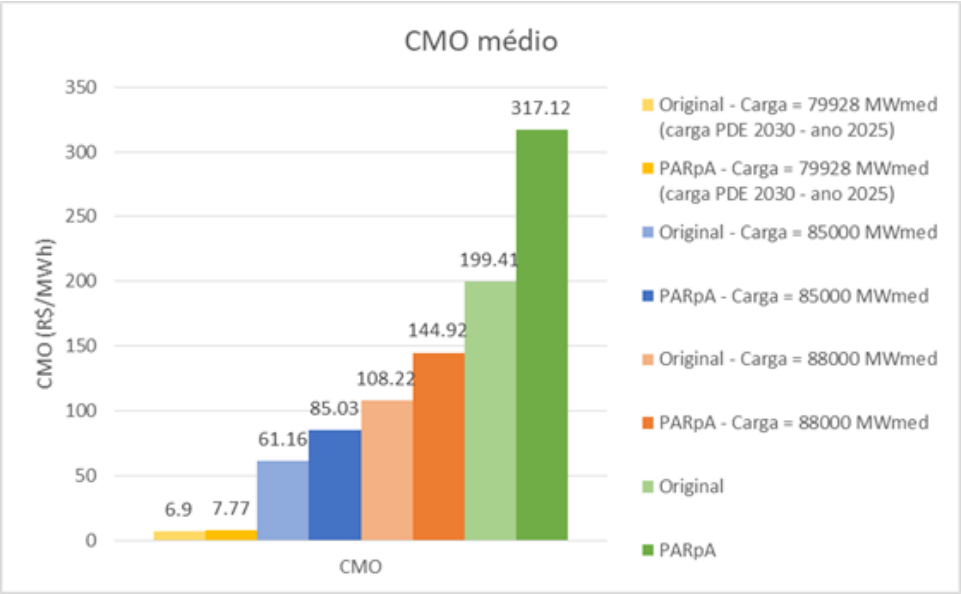


Figura 7 – CMO médio para casos com diferentes cargas, com PAR(p) em tons suaves e com o PAR(p)-A em tons vivos.

O gráfico a seguir mostra o percentual de aumento do CMO médio com o uso do PAR(p)-A para cada carga simulada. Para os casos ora apresentados, observa-se uma tendência de ampliação desse percentual para cargas maiores. No entanto, a partir da simulação de outras sensibilidades, em casos de PMO, verificou-se que a diferença entre os CMOs nos casos PAR(p) e PAR(p)-A depende do equilíbrio entre oferta e demanda, de maneira que em situações limites (carga muito baixa e carga muito alta) esperam-se diferenças pequenas entre as duas metodologias.

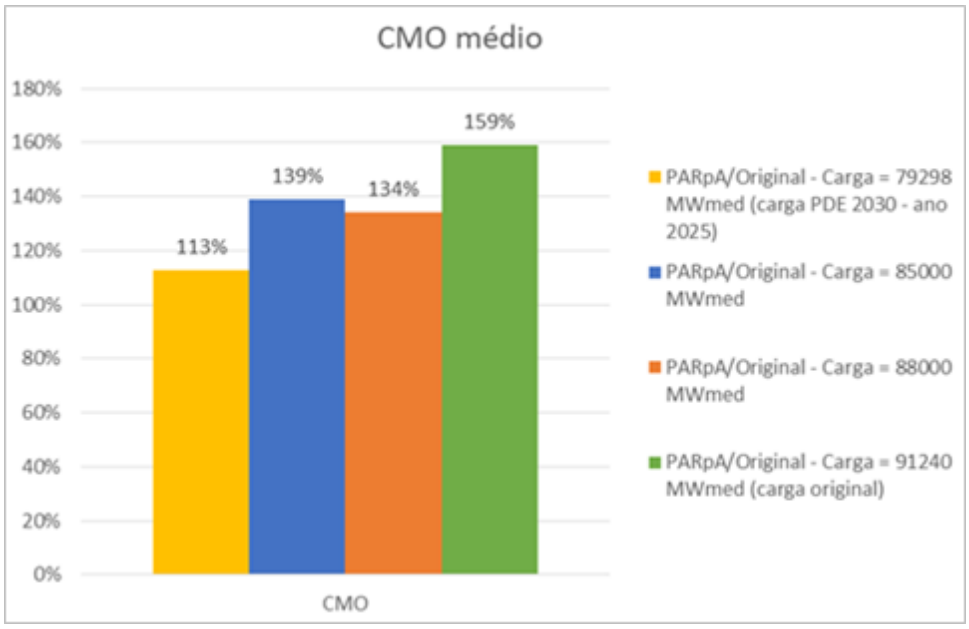


Figura 8 – Variação percentual do CMO médio para casos com diferentes cargas.

Com relação ao $CVaR_{10\%}$(CMO), o comportamento é semelhante. Observa-se que, nesses casos, o PAR(p)-A gerou um aumento de $CVaR_{10\%}$(CMO) para todas as cargas analisadas, principalmente no mês de novembro.

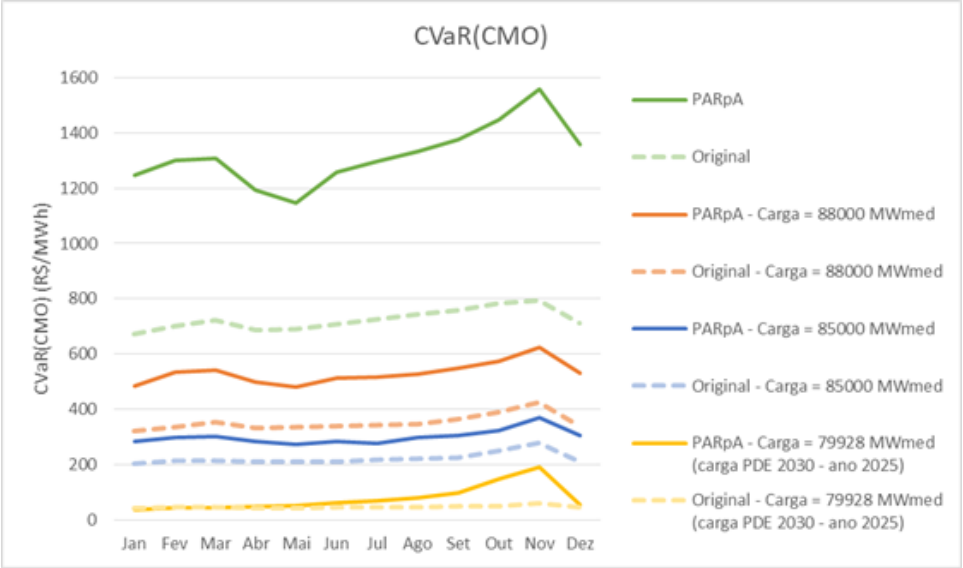


Figura 9 – $CVaR_{10\%}$(CMO) para casos com diferentes cargas, com PAR(p) em tons suaves e com o PAR(p)-A em tons vivos.

A análise do percentual de aumento do $CVaR_{10\%}$(CMO), como uso do PAR(p)-A para os casos de garantia física avaliados na Figura 10, indica impactos maiores nos casos com cargas mais elevadas.

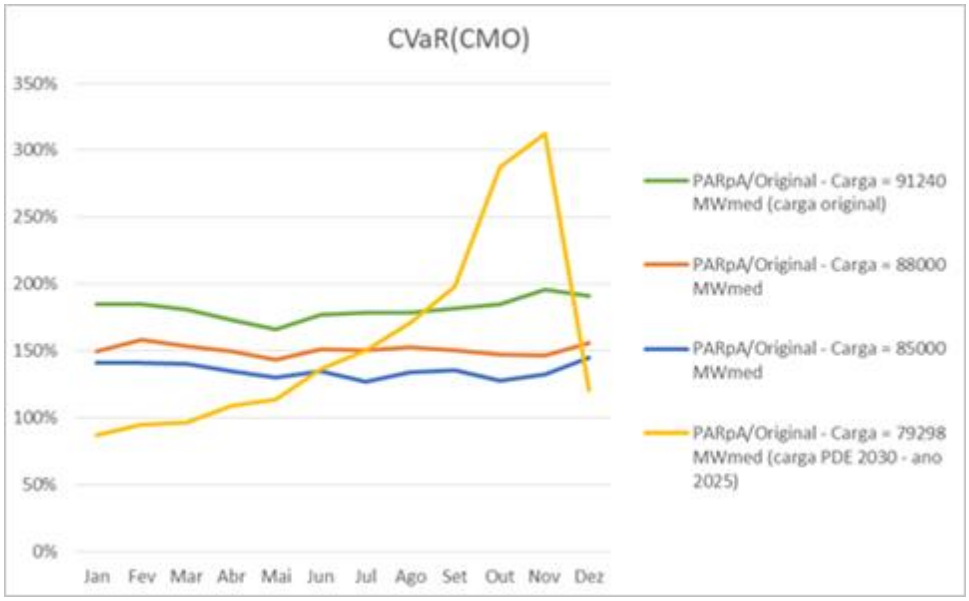


Figura 10 – Variação percentual do $CVaR_{10\%}$(CMO) para casos com diferentes cargas.

Dado que o caso de garantia física tem como objetivo estimar a carga crítica que é capaz de ser atendida pelo sistema, ele apresenta uma relação entre oferta e demanda relativamente estreita durante todo o horizonte, o que pode não ocorrer nos demais casos. Pode-se afirmar que essa característica é o diferencial que faz os casos de garantia física com a utilização do PAR(p)-A apresentar os impactos indicados nas análises acima.

Em continuidade, são apresentados no Capítulo 5 os resultados do modelo DECOMP com decks encadeados (NEWAVE/DECOMP) para o período de 2012 a 2015.

5. *Backtest* independente

Com base na metodologia apresentada nos documentos da atividade Representação Hidrológica, disponibilizados na Consulta Pública nº 103, de 13/01/2021, procedeu-se com a avaliação do uso da metodologia PAR(p)-A no modelo DECOMP pelo acoplamento com a Função de Custo Futuro (FCF) do modelo NEWAVE, de maneira independente, ou seja, sem incorporar aos modelos as demais funcionalidades em estudo pelo GT Met no presente ciclo.

A simulação retrospectiva encadeada com os referidos modelos tem por objetivo emular os processos de PMO e cálculo do PLD de maneira sequencial, acumulando os efeitos das decisões operativas ao longo do tempo. Para tal, foram simulados os modelos GEVAZP, DECOMP e NEWAVE para o período de janeiro/2012 a dezembro/2015, quando o SIN apresentou armazenamento de 80% do máximo no início do ano de 2012 e se vivenciou um cenário de escassez hídrica nas principais bacias hidrográficas que compõem o SIN, refletindo na decisão, por parte do CMSE, pelo acionamento de térmicas adicionais ao despacho na ordem de mérito dos modelos computacionais.

As versões utilizadas para o *backtest* foram:

- GEVAZP: versão 8.1.1;
- DECOMP: versão 30.2; e
- NEWAVE: versão 27.4.

Atualmente os modelos GEVAZP, DECOMP e NEWAVE encontram-se nas versões 8.1.3, 30.11 e 27.4.6 respectivamente. O cronograma da atividade não permitiu a atualização do *backtest* com as versões mais recentes, mas acredita-se que não haveria impacto significativo nos resultados.

5.1. Sensibilidades nos parâmetros do CVaR

Para viabilizar a análise das métricas de risco adequadas, exclusivamente relacionadas à atividade Representação Hidrológica, procedeu-se com as seguintes simulações e sensibilidades:

- **Vigente:** metodologia atualmente empregada nos modelos, que consideram o modelo tradicional PAR(p) na geração de cenários de vazões/ENAs e parâmetros CVaR (α=50%, λ=35%);
- **PAR(p)-A / CVaR (50,35):** metodologia proposta na geração de cenários de vazões/ENAs e parâmetros CVaR (α=50%, λ=35%), para se avaliarem os efeitos isolados do uso do modelo PAR(p)-A, comparativamente ao caso Vigente, mantendo o CVaR atual;

- **PAR(p)-A / CVaR (50,20):** metodologia proposta na geração de cenários de vazões/ENAs e parâmetros CVaR (α=50%, λ=20%), a fim de se compreender as respostas do modelo ao se utilizar o PAR(p)-A e reduzir a aversão a risco; e
- **PAR(p)-A / sem CVaR:** metodologia proposta na geração de cenários de vazões/ENAs, sem considerar parâmetros CVaR, objetivando avaliar o impacto do mecanismo em relação aos casos anteriores.

Ressalta-se que as simulações ora apresentadas são para melhor entendimento acerca dos possíveis efeitos da utilização da metodologia PAR(p)-A na cadeia de modelos atualmente empregada, não sendo o objetivo direcionar para o uso de determinado par de parâmetros CVaR. Devido ao cronograma da atividade, o referido *backtest* foi limitado aos quatro casos acima, a fim de permitir análises específicas sobre o modelo proposto.

O GT Met compreende a necessidade de os modelos responderem à situação atual do SIN, evitando medidas heterodoxas e priorizando a elevação dos níveis de armazenamento atuais. Conforme supracitado, análises detalhadas para diversos pares de parâmetros CVaR são abordadas no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 06-2021, que apresenta uma visão sistêmica ao considerar todos os temas em estudo pelo grupo, inclusive o PAR(p)-A.

5.2. Encadeamento NEWAVE/DECOMP: janeiro/2012 a dezembro/2015

A simulação retrospectiva do período de janeiro de 2012 a dezembro de 2015 possibilitou a avaliação do comportamento das principais variáveis do sistema, tais como: CMO/PLD, armazenamento e geração térmica, considerando os decks oficiais da época na configuração atual e com as funcionalidades atualmente empregadas nos modelos.

A Figura 11 apresenta as trajetórias do CMO/PLD oficiais (linha tracejada, referente ao PLD publicado à época, em cada revisão) e simuladas para o submercado Sudeste/Centro-Oeste. Observa-se que, ao comparar o caso Vigente (azul escuro) com o caso PAR(p)-A / CVaR (50,35) (vermelho), tal como verificado nos casos de NEWAVE e *backtest* preliminar apresentados no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-

2020, a inclusão da parcela anual eleva os custos de operação, que refletem diretamente no CMO/PLD. No entanto, entre maio e dezembro/2015 verifica-se o cenário contrário, em que o caso Vigente, que utiliza o PAR(p) tradicional e CVaR (50,35), apresentou custos mais elevados que os casos com PAR(p)-A, exceto no caso sem CVaR (amarelo) ao final do período.

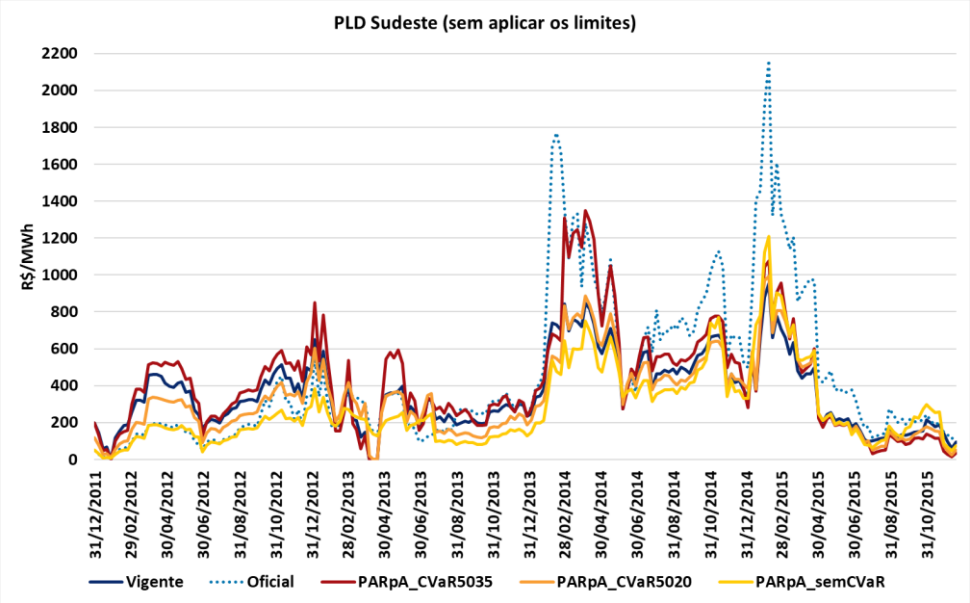


Figura 11 – CMO/PLD do submercado Sudeste/Centro-Oeste obtido na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

Ao se reduzir o parâmetro λ para 20%, empregando o par CVaR (50,20) e a metodologia PAR(p)-A (laranja), pode-se verificar que, ainda que o uso do PAR(p)-A indique, geralmente, uma maior aversão a risco, a redução do parâmetro foi mais significativa no sentido contrário, refletindo diretamente em menores valores de CMO/PLD quando comparado ao caso atualmente vigente.

Nos demais submercados os resultados foram semelhantes, apresentados no Anexo A.

A Figura 12 apresenta as variações das médias anuais do PLD SE/CO dos casos simulados com o PAR(p)-A em relação ao caso Vigente. Nela, fica mais evidente as diferenças em termos absolutos dos PLDs, podendo-se observar que o caso PAR(p)-A / CVaR (50,35) apresenta acréscimo em relação ao Vigente de 2012 a 2014, com destaque para 2014, com diferença média anual de cerca de +R$ 136,70/ MWh.

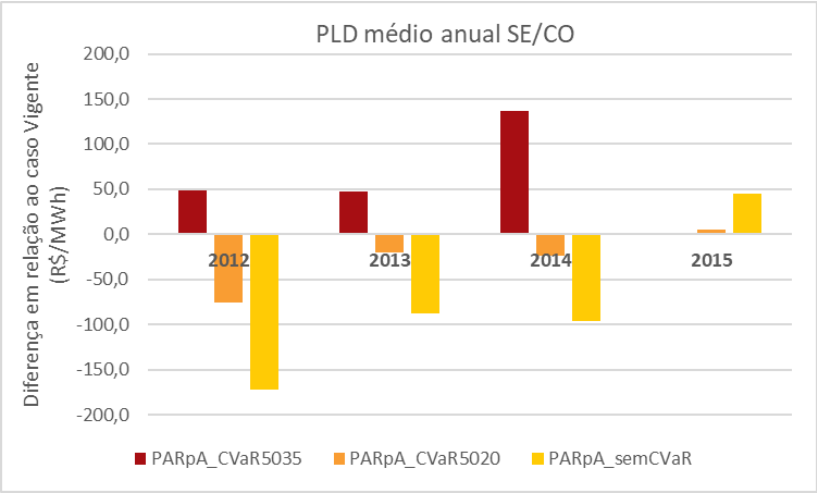


Figura 12 – CMO/PLD do submercado Sudeste/Centro-Oeste obtido na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

Além das análises gráficas apresentadas, a título de informação foram calculadas também métricas relacionadas à volatilidade do CMO/PLD. A primeira métrica é a volatilidade clássica, calculada por:

$$Vol = \sqrt{\frac{1}{T-1} \cdot \sum_{t=1}^{T} (R_t - E[R])^2} \; ; R_t = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right) \tag{1}$$

Onde:

Vol Volatilidade na base temporal dos estágios (semanal no caso).

R_t Retorno do tempo t.

P_t Valor da amostra do tempo t.

P_{t-1} Valor da amostra do tempo $t-1$.

E Operador que indica o cálculo da média dos retornos.

T Número total de amostras.

Para encontrar a volatilidade mensal basta multiplicar Vol por $\sqrt{4}$ (considerando um mês de 4 semanas).

A Tabela 2 apresenta a volatilidade média mensal e semanal para os casos analisados. Nota-se que o uso da metodologia PAR(p)-A nos três casos encadeados (CVaR (50,35), CVaR (50,20) e sem CVaR) indicou menor volatilidade que o caso Vigente, reduzindo de maneira proporcional em relação aos parâmetros do mecanismo de aversão a risco.

Ressalta-se que no cálculo da volatilidade, para coerências dos cálculos, foram retiradas as séries de preço com valores nulos de CMO/PLD. Esse procedimento foi necessário sobretudo para evitar divisões por zero nos cálculos apresentados em (1).

Esses valores nulos são ocasionados pelos acoplamentos entre submercados, sobretudo no período úmido. Desta forma, esse tipo de ponto operacional não é representativo em termos de volatilidade comparativa uma vez que praticamente todas as simulações apresentaram o mesmo comportamento.

Tabela 2 – Métricas de volatilidade calculadas na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

Caso	Volatilidade Semanal	Volatilidade em base Mensal
Vigente	83%	167%
PARpA_CVaR5035	70%	140%
PARpA_CVaR5020	56%	112%
PARpA_semCVaR	35%	69%

O comportamento do CMO/PLD, por sua vez, está diretamente associado às decisões do modelo quanto ao despacho térmico, que pode ser observado nas Figura 13 (valores absolutos a cada PMO e revisão) e Figura 14 (média da geração acumulada a cada PMO e revisão). No caso PAR(p)-A / CVaR (50,35), até meados de março/2012 houve igual ou menor despacho que o caso Vigente, cenário que se repetiu a partir de maio/2015. Ao se comparar a média da geração térmica acumulada, verifica-se maior acionamento de térmicas em grande parte do horizonte (linha vermelha *versus* linha azul). Conforme esperado, dada a análise do CMO/PLD, os casos com parâmetro menor (laranja) ou sem CVaR (amarelo) apresentam menor geração por termelétricas ao longo do horizonte.

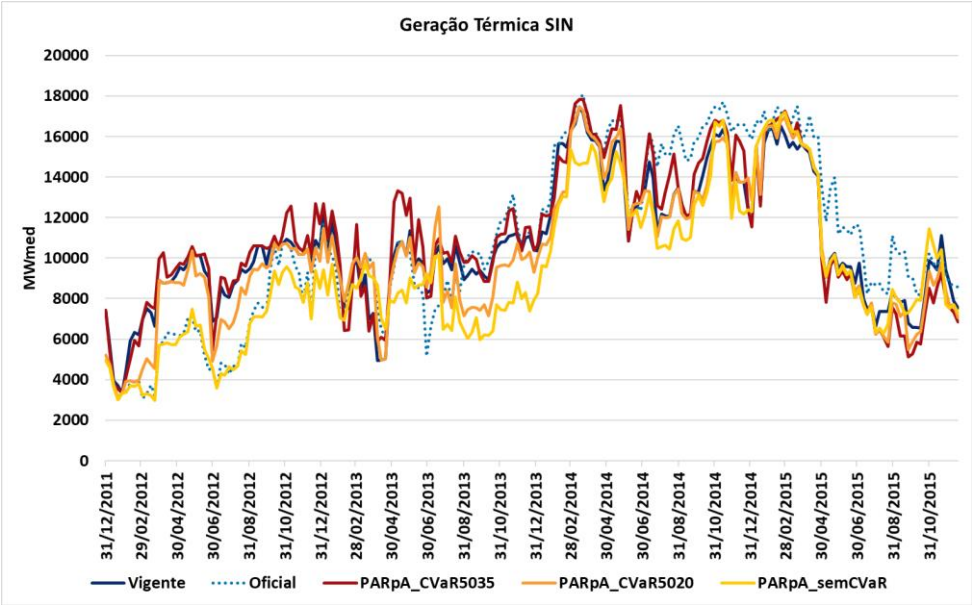


Figura 13 – Geração térmica obtida na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

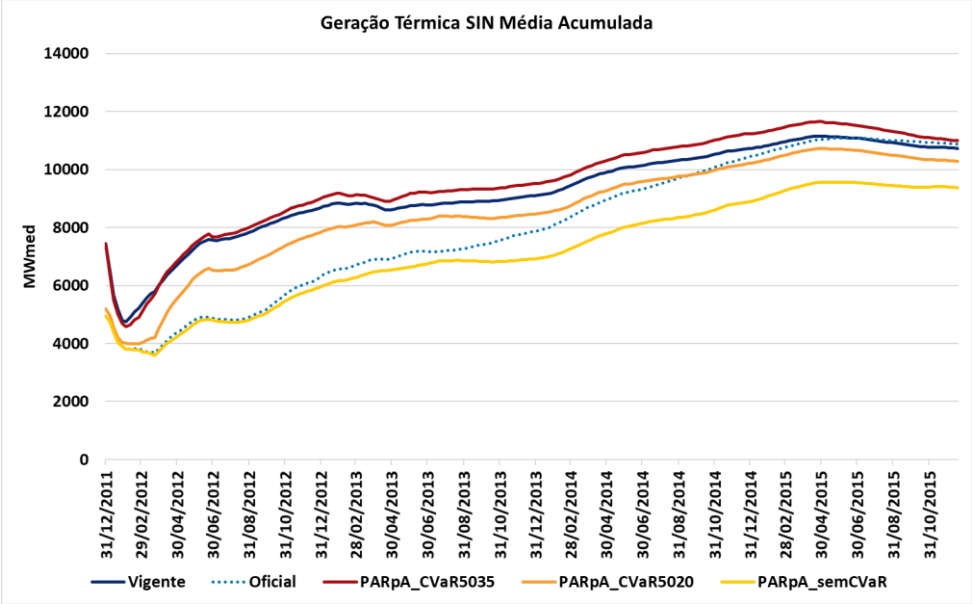


Figura 14 – Geração térmica média acumulada obtida na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

A análise por submercado reflete os mesmos resultados, ainda que cada um tenha sua representatividade em termos de disponibilidade de térmicas no SIN. Os gráficos de geração térmica (em termos absolutos e média acumulada) são apresentados no Anexo A.

Como consequência desse maior despacho térmico ao se empregar a metodologia PAR(p)-A sem alterar o CVaR atualmente modelado, a trajetória de

armazenamento dessa simulação foi superior ao caso Vigente, como pode ser visto também ao comparar as linhas vermelha e azul na Figura 15.

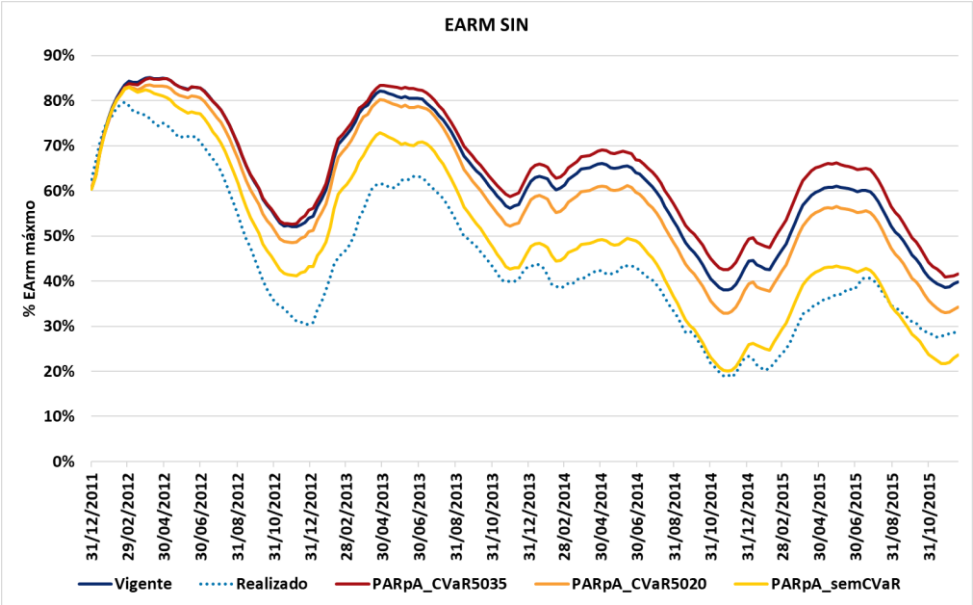


Figura 15 – Percentual da Energia Armazenável Máxima do SIN obtido na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2014.

Verifica-se também que, apesar do caso PAR(p)-A / CVaR (50,20) apresentar armazenamento muito próximo ao caso Vigente no início do horizonte simulado, o menor despacho térmico ao longo dos meses contribuiu significativamente para a redução do armazenamento no SIN.

Adicionalmente, na Figura 16 apresentam-se as diferenças do armazenamento no SIN ao final de cada mês de novembro dos casos com PAR(p)-A em relação ao caso Vigente. Com isso, destaca-se o ganho de armazenamento ao final de cada período seco no caso PAR(p)-A / CVaR (50,35), principalmente em novembro/2014. Evidencia-se, ainda, que o caso PAR(p)-A / CVaR (50,20) reduziu em 5,7% o armazenamento do SIN em novembro/2015. Em termos absolutos, esta diferença representa 16.640 Mwmês (EArm máximo à época no SIN = 290.293 Mwmês).

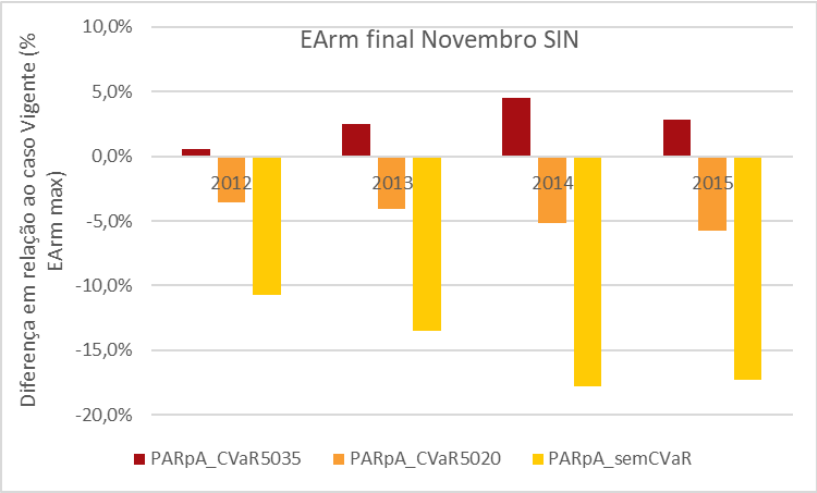


Figura 16 – Armazenamento percentual no SIN ao final de novembro de cada ano na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

Os gráficos de armazenamento por submercado direcionam para conclusões semelhantes e se encontram no Anexo A.

6. Recomendações

Nas análises dos resultados dos modelos GEVAZP e NEWAVE e do *backtest* preliminar (apresentadas detalhadamente no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-2020) identificou-se a tendência a se obter custos totais de operação mais elevados ao se empregar a metodologia PAR(p)-A, quando comparada ao PAR(p). O principal responsável por essa elevação foi o maior despacho de termelétricas, em resposta à geração de cenários de ENA mais pessimistas ao se utilizar a parcela anual.

Nos resultados do *backtest* ora apresentados, que abrangem o período de janeiro/2012 a dezembro/2015, buscou-se comparar o caso Vigente, que emprega a metodologia PAR(p), com três sensibilidade de CVaR para o PAR(p)-A: CVaR (50,35), CVaR (50,20) e sem CVaR. Ressalta-se que os dois casos que reduzem os parâmetros são para fornecer um melhor entendimento acerca do comportamento dos modelos ao se adotar uma metodologia que tende a gerar cenários mais severos que a atual, agregando por si só certa aversão a risco. Assim, permite-se analisar o quanto a redução do CVaR poderia ser compensada pela adoção do PAR(p)-A, não sendo a pretensão indicar um par de parâmetros a ser utilizado. Esta análise, de maneira abrangente e que engloba todas as atividades em estudo pelo GT Met, é descrita no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 06-2021.

Os resultados mostraram que o uso do PAR(p)-A, mantendo o CVaR atual, elevou o despacho térmico e, consequentemente, o CMO/PLD na maioria das semanas do horizonte analisado, quando comparado ao caso Vigente. Com isso, obtiveram-se ganhos no armazenamento no SIN. A redução do parâmetro λ para 20% reduziu o CMO/PLD em relação ao caso Vigente, bem como a geração térmica e o armazenamento, mostrando que essa sensibilidade no CVaR impactou mais nos resultados do que as possíveis respostas do modelo a cenários mais severos de vazões/ENAs oriundos do PAR(p)-A.

Ao longo do estudo, as instituições apresentaram ao CEPEL dúvidas e sugestões de aprimoramentos, bem como os agentes indicaram nas contribuições à Consulta Pública nº 103. Com base nisso, elencam-se os seguintes aperfeiçoamentos futuros:

1. Inclusão nos relatórios e/ou manuais de metodologia do CEPEL de detalhamentos sobre como é considerada a mudança de configuração durante o ajuste do modelo ao se empregar a metodologia PAR(p)-A;
2. Inclusão nos relatórios e/ou manuais de metodologia do CEPEL de detalhamentos sobre como é realizada a redução automática da ordem ao se considerar o PAR(p)-A;
3. Definição de um critério de significância do coeficiente *psi* (ψ) para consideração da parcela anual na geração de cenários do modelo PAR(p)-A. Entende-se que, a partir dessa informação, o impacto da inclusão da parcela anual na alteração da ordem (p) do modelo ou na magnitude dos coeficientes *fi* (ϕ) será mais claro;
4. Consideração do processo de identificação da ordem tal como é realizado no PAR(p)-A (correlações condicionadas) também para o modelo vigente - PAR(p), sem a simplificação referenciada em literatura. Com isso, as comparações entre os modelos serão mais claras, sem a necessidade de elaboração de cálculos pelo usuário, além daqueles que são realizados nos modelos GEVAZP e NEWAVE; e
5. Aprimoramento das versões dos modelos GEVAZP e NEWAVE de forma a permitir a simulação de diferentes horizontes da parcela da hidrologia recente (6 meses, 2 anos e outros). Espera-se, assim, buscar sensibilidades

do comportamento da geração de cenários em relação à parcela incorporada no PAR(p).

Exposto isso, o GT Met recomenda a adoção da metodologia PAR(p)-A na geração de cenários e construção da Função de Custo Futuro (FCF) nos modelos computacionais a partir de janeiro/2022. Os resultados ora apresentados são promissores e deverão contribuir para a melhor representação hidrológica, importante variável para as decisões de despacho do modelo e o cálculo do PLD. Além disso, dados os cinco itens expostos acima, deve-se priorizar os aperfeiçoamentos relacionados à metodologia, devendo-se reavaliar a mesma após as implementações sugeridas.

7. Referências Bibliográficas

(1) CEPEL: Relatório Técnico 1416/2020 - Proposta Metodológica para o Aprimoramento da Memória de Modelos Auto-Regressivos Periódicos. Fevereiro de 2020.

(2) CEPEL: Relatório Técnico 2002/2020 - Consideração do Modelo Auto-Regressivo Periódico Anual (PAR(p)-A) no Algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica. Julho de 2020.

(3) CEPEL: Relatório Técnico 1274/2021 – Testes Estatísticos para Avaliação de Aderência entre Séries Históricas de Energias Naturais Afluentes ao SIN e Cenários Sintéticos dos modelos PAR(p) e PAR(p)-A. Maio de 2021.

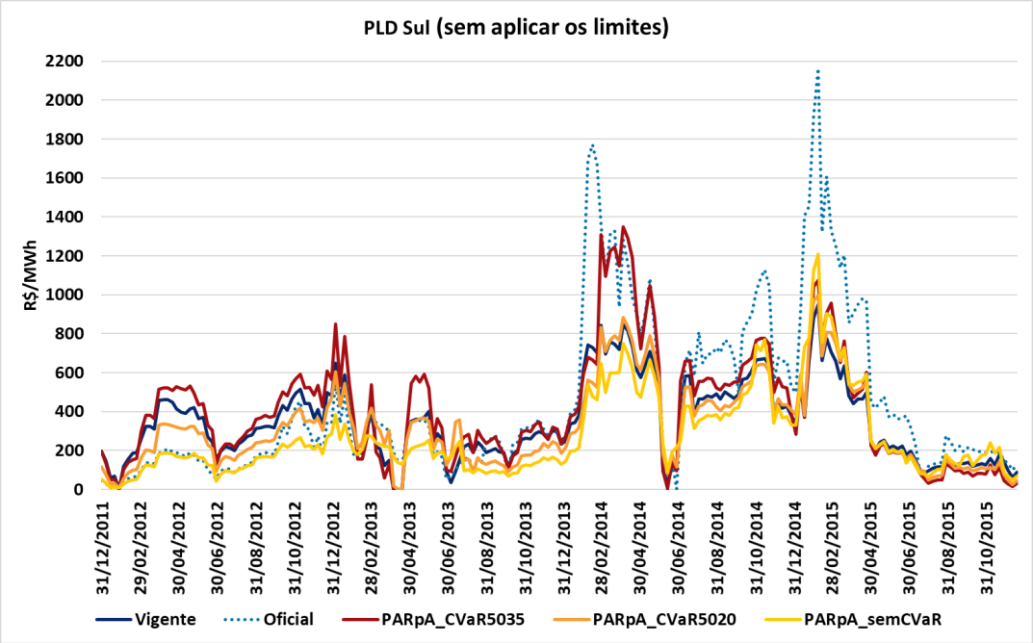
(4) CPAMP: Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 05-2019. Representação Hidrológica: Geração de Cenários. Consulta Pública nº 74 de 26/06/2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>.

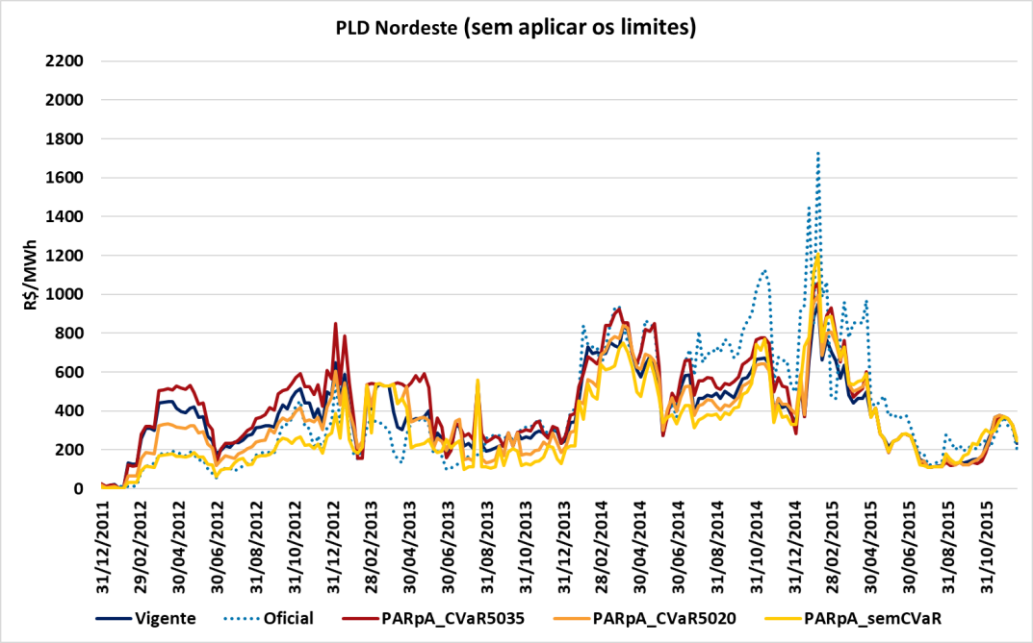
(5) CPAMP: Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 02-2020. Representação Hidrológica: Geração de Cenários. Consulta Pública nº 103 de 13/01/2021. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>.

(6) CPAMP: Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 06-2021. Avaliação da parametrização do CVaR. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>.

8. Anexos

Anexo A: Outros resultados das rodadas de *backtest* independente





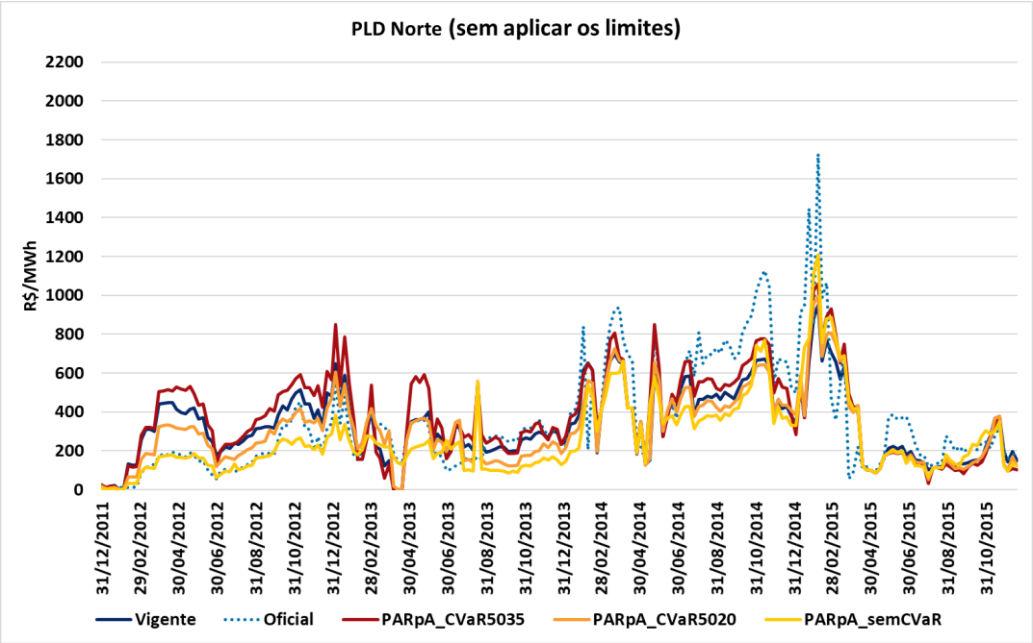


Figura A.1 – CMO/PLD dos submercados Sul, Nordeste e Norte obtidos na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

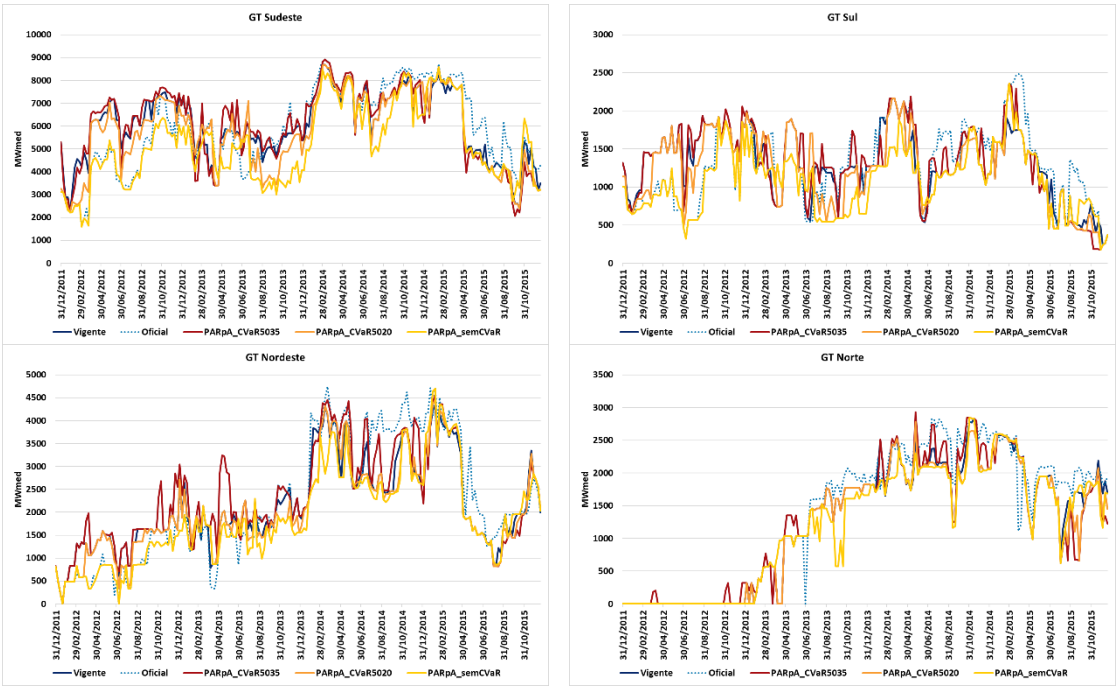


Figura A.2 – Geração térmica obtida na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

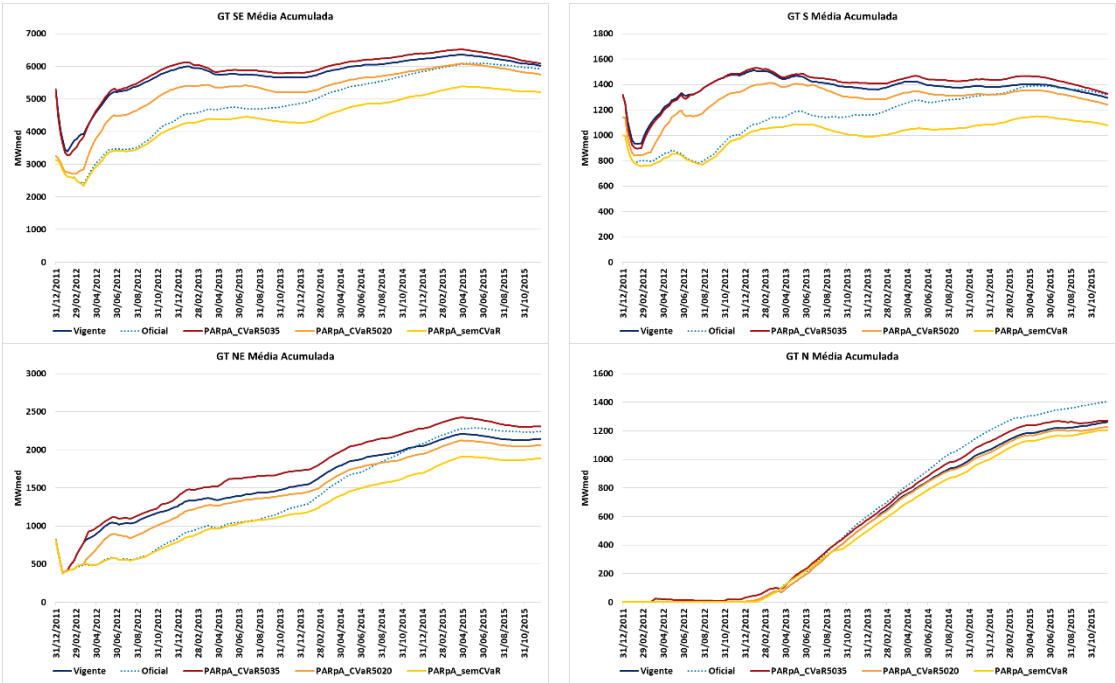


Figura A.3 – Geração térmica média acumulada obtida na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2015.

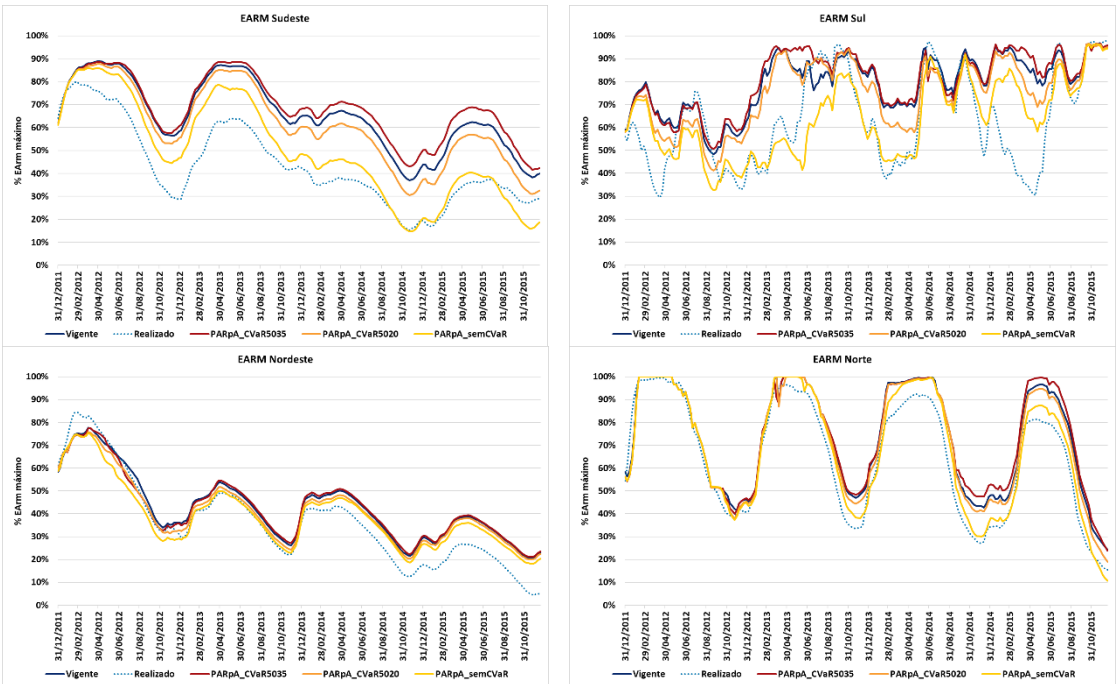


Figura A.4 – Percentual da Energia Armazenável Máxima por submercado obtido na simulação retrospectiva encadeada de 2012 a 2014.