

APRIMORAMENTOS NA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE AVERSÃO AO
RISCO (SAR) PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE MÉDIO/LONGO
PRAZO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Cesar Luis Vilasbôa de Vasconcellos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(es): Carmen Lucia Tancredo Borges
André Luiz Diniz Souto Lima

Rio de Janeiro

Março de 2016

APRIMORAMENTOS NA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE AVERSÃO AO
RISCO (SAR) PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE MÉDIO/LONGO
PRAZO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Cesar Luis Vilasbôa de Vasconcellos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Carmen Lúcia Tancredo Borges, Ph.D.

Dr. André Luiz Diniz Souto Lima, Ph.D.

Dra. Maria Elvira Piñero Maceira, Ph.D.

Dr. Vitor Luiz de Matos, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2016

Vasconcellos, Cesar Luis Vilasbôa de

Aprimoramentos na Metodologia de Superfície de Aversão ao Risco (SAR) para o Problema de Planejamento de Médio/Longo Prazo da Operação de Sistemas Hidrotérmicos / Cesar Luis Vilasbôa de Vasconcellos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XI, 85 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador(a): Carmen Lucia Tancredo Borges

André Luiz Diniz Souto Lima

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 83-85.

1. Planejamento da Operação Energética. 2. Aversão ao Risco. 3. Sistemas Hidrotérmicos 4. Programação Paralela. I. Borges, Carmen Lúcia Tancredo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Ao meu Pai Luiz, minha mãe Maria,
meus irmãos Josi e Anderson,
aos meus sobrinhos Luísa,
Davi, Valentina e Ian e
em especial minha esposa Emanuelle.

AGRADECIMENTOS

- A Deus
- Um agradecimento especial a minha esposa Emanuelle que sempre me ajudou, mas que me apoiou ainda mais durante essa dissertação. Você foi fundamental na conclusão desse trabalho.
- Aos meus pais Luiz e Maria que sempre me incentivaram a estudar.
- Aos meus irmãos Josi e Anderson pela preocupação.
- Aos meus sobrinhos Luísa, Davi, Valentina e Ian. Vocês são muito especiais.
- Ao meu orientador Diniz por toda paciência e ajuda durante a dissertação.
- A minha orientadora Carmen por todas as cobranças e ajudas durante o trabalho.
- A Maria Elvira pelo incentivo a fazer este mestrado.
- Aos amigos Leonardo e Amanda por estarem sempre por perto.
- As minha amigas Luana, Fernanda e Amanda que apesar de distância sempre estão preocupadas.
- Aos meus amigos do CEPEL Débora, Cristiane, Thatiana, Felipe, Amauri, Bruno, Fabio Lares, Valk, Renato, Alexia, Fabio Batista, Luiz Guilherme, Ana Carolina, Tiago, Roberto, Ricardo, Flávia, Priscilla, Luis Fernando, Lilian e Wanderson por toda ajuda.
- Aos amigos André Emannel e Pamella pela ajuda durante o mestrado e por todos os desafios que passamos juntos.
- Aos amigos Flavius e Túlio pela ajuda desde o período de graduação e a Aline, Juliana e Fernandinha pela amizade.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APRIMORAMENTOS NA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE AVERSÃO AO RISCO (SAR) PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE MÉDIO/LONGO PRAZO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Cesar Luis Vilasbôa de Vasconcellos

Março/2016

Orientadores: Carmen Lúcia Tancredo Borges

André Luiz Diniz Souto Lima

Programa: Engenharia Elétrica

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de geração de energia elétrica tem como objetivo definir metas de geração térmica e hidráulica para as diversas usinas do sistema tendo em vista as condições operativas e restrições elétricas do sistema. O atendimento às cargas do sistema deve ser realizado atendendo critérios de minimização de custo e segurança no fornecimento. Para aumentar a segurança no fornecimento de energia, em 2013 foram internalizadas no modelo de planejamento da operação hidrotérmica de médio/longo prazo duas metodologias para aversão a risco, o Conditional Value at Risk (CVaR) e a Superfície de aversão a risco (SAR). Esta última metodologia apresentou duas desvantagens: o elevado tempo computacional e a perda de intuição do valor a ser utilizado na penalização pelo não atendimento a essas restrições, devido ao efeito acumulativo de sua violação em períodos consecutivos. Este trabalho tem como objetivo propor dois aprimoramentos na metodologia SAR: a construção a priori das restrições da SAR utilizando técnicas de processamento paralelo, para reduzir o tempo computacional, e uma nova formulação para a penalização pelo não atendimento a essas restrições, que evita o acúmulo de penalidades e garante um caráter intuitivo para escolha do valor a ser utilizado. Resultados são apresentados para estudos de caso reais com o programa mensal da operação (PMO) do sistema brasileiro.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ENHANCEMENT IN RISK AVERSION SURFACE (RAS) METODOLOGY FOR
MEDIUM/LONG TERM POWER GENERATION PLANNING

Cesar Luis Vilasbôa de Vasconcellos

March/2016

Advisors: Carmen Lúcia Tancredo Borges

André Luiz Diniz Souto Lima

Department: Electrical Engineering

The power generation planning in hydrothermal systems aims to define generation targets for thermal and hydro generation plants considering operation conditions and electrical constraints on the system. Total system demand must be met taking into account criteria based on cost minimization and security of supply. In order to increase the system security, two new risk averse methodologies were implemented in 2013 in the official mid-term power generation planning model for the Brazilian system: Conditional Value at Risk (CVAR) and Risk-Averse Surface (SAR). The latter methodology had two crucial disadvantages: a high computational time and a non-intuitive value for the penalty that should be applied for not meeting these constraints, due to the cumulative effect of their violation along consecutive periods. This work aims to propose two improvements in the SAR methodology: an a priori construction of the SAR constraints using parallel processing techniques, in order to reduce the CPU time, and a new methodology to penalize violation of SAR constraints, which avoids the afore mentioned cumulative effect and the loss of intuition on the penalty value. Results are presented for real test cases of the Monthly operational planning of the Brazilian system.

ÍNDICE:

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto	1
1.2 Contribuição do trabalho	2
1.3 Relevância do trabalho	3
1.4 Etapas de desenvolvimento e estrutura do trabalho	4
2. PLANEJAMENTO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS	5
2.1 Planejamento com aversão a risco	8
3. AVERSÃO A RISCO NO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO HIDROTÉRMICO	10
3.1 Penalização ao corte de carga	10
3.2 Uso de curvas-guias	10
3.2.1. Curva de aversão a risco (CAR)	11
3.2.2. SAR.....	11
3.3 Restrições probabilísticas	12
3.4 CVaR.....	12
4. PLANEJAMENTO DE MÉDIO/LONGO PRAZO DO SISTEMA BRASILEIRO.....	14
4.1 Modelo Newave	14
4.2 Modulo de geração de cenários afluições	15
4.3 Formulação do Problema	16
4.4 Estratégia de Solução	22
4.4.1. Cortes de Benders	23
5. SUPERFÍCIE DE AVERSÃO A RISCO - ESTADO DA ARTE NO BRASIL	25
5.1 Hipóteses básicas	25
5.2 Metodologia geral de otimização - SAR construída durante a PDDE	26
5.3 Formulação matemática do subproblema da SAR	27
5.3.1. SAR não condicionada.....	28
5.3.2. SAR condicionada	31
5.4 Restrição da SAR	31
5.4.1. Coeficientes de armazenamento para restrição da SAR	32
5.4.2. Coeficientes para as afluições passadas	33
5.4.3. Subproblema do Newave com as restrições da SAR	35
5.5 Folga para restrição da SAR	36
5.5.1. Variável de folga única	36
5.5.2. Variáveis de folga diferentes para cada restrição.....	37

5.5.3.	Abordagem híbrida: variáveis de folga diferentes por tipo de restrição	38
5.6	Discussão sobre as penalidades utilizadas para as variáveis no subproblema da SAR.....	38
5.6.1.	Avaliação da recursão Newave-SAR considerando penalidades diferentes	38
5.6.2.	Avaliação da recursão Newave-SAR considerando penalidade única.....	40
5.6.3.	Avaliação do valor a ser utilizado para penalidade da SAR	42
6.	PROPOSTAS DE APRIMORAMENTO DA SAR.....	43
6.1	Processo alternativo de penalização de violações da SAR.....	43
6.1.1.	Motivação	43
6.1.2.	Metodologia	45
6.2	SAR a priori	47
6.2.1.	Discretização dos níveis de armazenamento.....	48
6.2.2.	Vantagem na construção da SAR a priori.....	49
6.3	Paralelização do procedimento de construção da SAR a priori	50
7.	RESULTADOS NUMÉRICOS	54
7.1.1.	Resultados da Operação.....	57
7.1.2.	Resultados da Simulação Final	58
7.1.3.	Custo Operativo	58
7.1.4.	Comentários	69
7.1.5.	Eficiência do uso da SAR:	70
7.1.6.	Tipos de restrição.....	71
7.2	Eficiência da SAR a priori	72
7.2.1.	Tempo por iteração	73
7.2.2.	Resultado da operação	75
8.	CONCLUSÕES	81
8.1	Desenvolvimentos Futuros.....	82
9.	REFERÊNCIAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Consequências da decisão operativa [11].	6
Figura 2.2 – Cadeia de modelos utilizados no planejamento	7
Figura 4.1 – Representação da árvore de cenários	15
Figura 4.2 - Árvore de cenários utilizada no Newave.	16
Figura 5.1 – Processo iterativo para construção de superfície de aversão a risco.....	27
Figura 5.2 - Superfície de aversão a risco para com os dados da tabela 1	30
Figura 5.3 – Interpretação gráfica para as restrições da SAR: Uma análise de sensibilidade da solução ótima para o subproblema da SAR (esquerda) e o corte de viabilidade incluído no problema da PDDE (direita).	33
Figura 5.4 – Avaliação do valor de violação utilizando uma única variável de folga....	37
Figura 5.5 – Regiões de violação da SAR.	41
Figura 6.1 – Evolução da Energia armazenada para um caso exemplo.	44
Figura 6.2 - Exemplo de discretização de armazenamento.	49
Figura 6.3 - Esquema de paralelização utilizada na recursão backward.	51
Figura 6.4 - Esquema de paralelização da SAR a priori.....	52
Figura 6.5 - Esquema de paralização da bacward considerando a construção da SAR a priori	53
Figura 7.1 - Topologia dos subsistemas/submercados.	56
Figura 7.2 – Análise da convergência.	57
Figura 7.5 – Custo operativo sem corte de carga por otimização.....	58
Figura 7.6 – Risco de déficit para os subsistemas/submercados sem corte de carga por otimização.....	59
Figura 7.7 – Custo marginal de operação	60
Figura 7.8 - Energia armazenada final para cada reservatório equivalente.	61
Figura 7.9 – Energia armazenada final média mensal para o SIN	61
Figura 7.10 – Distribuição de armazenamento final percentual do Sudeste para novembro.....	62
Figura 7.11 – Distribuição de armazenamento final percentual do Nordeste para novembro.....	63
Figura 7.12 - Geração térmica média mensal para os submercados/subsistemas.	64
Figura 7.13 – Geração térmica média mensal para o SIN.	64

Figura 7.14 – Déficit médio mensal para os submercados/subsistemas e para o SIN....	65
Figura 7.15 – Custo marginal de operação médio mensal para os submercados/subsistemas.	66
Figura 7.16 - Geração hidráulica média mensal para os reservatórios equivalentes de energia e para o SIN.	67
Figura 7.17 - Vertimento médio mensal para os reservatórios equivalentes de energia e para cada reservatório equivalente de energia.	68
Figura 7.18 – Vertimento médio mensal para os reservatórios para o SIN.....	69
Figura 7.19 - Percentual de violação das restrições da SAR.	71
Figura 7.20 – Tempo por iteração	74
Figura 7.21 – Tempo por iteração até a quinta iteração.	74
Figura 7.22 - Custo marginal de operação.....	76
Figura 7.23 – Risco de déficit.....	76
Figura 7.24 – Tempo total de simulação	77
Figura 7.25 – Tempo total com número fixo de iterações.....	78
Figura 7.26 - Fator de aceleração do programa Newave.....	79
Figura 7.27 - Eficiência do modelo Newave.	80

1. INTRODUÇÃO

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de geração de energia elétrica tem como objetivo definir metas de geração térmica e hidráulica para as diversas usinas do sistema tendo em vista as condições operativas e restrições elétricas do sistema 9.[1]. O atendimento às cargas do sistema deve ser realizado atendendo critérios de minimização de custo e segurança no fornecimento. Para garantir essa segurança no fornecimento energético existem os chamados métodos de aversão a risco, como níveis mínimos operativos, onde é necessário que os reservatórios do sistema operem acima de um determinado nível de armazenamento, e despachos térmicos mínimos com objetivo de proteger o sistema contra cenários críticos, função de custo de déficit, pois o déficit está diretamente ligado ao custo, entre outros 9.[2],9.[3] ,9.[4] ,9.[5] .

1.1 Contexto

Em março de 2013 o Conselho Nacional de Políticas Energéticas (CNPE) publicou a resolução CNPE nº 3/2013 9.[6] determinou que a Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais (CPAMP) desenvolvesse e implementasse metodologias para incorporação de aversão a risco internamente aos programas computacionais de estudos energéticos e de formação de preços, em substituição a Curva de Aversão ao Risco (CAR) que era a metodologia utilizada na época, que apesar de ser interna ao modelo, os valores utilizados para os níveis dos reservatórios obedeciam uma metodologia externa. Assim o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), responsável por tais programas computacionais, internalizou nos modelos utilizados para o planejamento da operação duas novas metodologias de aversão a risco, descritas a seguir:

- O Conditional Value at Risk (CVaR), proposto pela primeira vez na programação dinâmica dual estocástica (PDDE) em 9.[7], onde os cenários de afluência mais críticos recebem um peso maior na obtenção do custo médio que é utilizado para construção dos cortes da função de custo futuro. Esta metodologia será vista com mais detalhes no capítulo 3.4.
- A Superfície de Aversão a Risco (SAR), inicialmente proposta em 9.[8], onde são inseridas restrições nos subproblemas da PDDE com o objetivo de estabelecer

condições mínimas para a combinação dos níveis de armazenamento dos diversos reservatórios do sistema, ao longo do período seco, com o objetivo de atender a um dado nível meta de armazenamento ao final desse período sem a ocorrência de déficit. Essa metodologia é o objeto deste trabalho e será visto com mais detalhes no capítulo 5.

Durante os testes realizados pela CPAMP com estas duas novas metodologias, foram observadas duas questões em relação a SAR:

- **Valor a ser utilizado na penalidade da SAR:** Devido às condições iniciais de armazenamento e as afluências para um determinado estágio, pode não ser possível atender as restrições da SAR no subproblema da PDDE. Portanto é necessário incluir uma variável de folga nessas restrições, que deve ser penalizada na função objetivo. Na metodologia implementada o não atendimento as restrições da SAR é penalizado em todos os períodos, podendo levar a um acúmulo de penalidade e assim a escolha do valor a ser utilizado para essa penalização não é intuitiva. Originalmente, a intenção era penalizar tal violação com um valor um pouco abaixo do custo do primeiro patamar de déficit.
- **Tempo computacional elevado:** Como é necessário resolver um subproblema de otimização adicional após cada subproblema resolvido durante o processo de convergência da PDDE, o tempo computacional da SAR não ficou competitivo em relação à alternativa CVaR.

1.2 Contribuição do trabalho

O presente trabalho visa contribuir com o aprimoramento da metodologia da SAR nos dois aspectos mencionados no item anterior, através dos seguintes procedimentos:

a) **Modificação na forma de penalização pelo não atendimento as restrições da SAR**

Penalizar na função objetivo do problema da PDDE o não atendimento as restrições da SAR a todo período pode trazer um acúmulo indesejado de penalizações e dificultar a escolha do valor do custo a ser utilizado para esta penalidade. Neste trabalho é proposta uma forma alternativa de penalização, onde

somente a máxima violação ocorrida entre todos os períodos que tem restrições da SAR é penalizada e tal penalização é aplicada no período anterior ao período onde é aplicada a meta. Como nesta nova formulação a variável de folga é penalizada na função objetivo apenas no período anterior ao período onde é aplicada a meta, é necessário incluir uma variável de estado adicional nos cortes da função de custo futuro nos demais períodos, com o intuito de sinalizar a máxima violação já ocorrida dentre todos os períodos passados, para fins de aplicação do custo referente a essa violação ao final do período seco.

b) Alternativa para construção das restrições da SAR com o objetivo de redução do tempo computacional

Como é necessário resolver um subproblema de otimização adicional ao final de cada subproblema da PDDE para a construção das restrições da SAR, a metodologia implementada originalmente tornou-se muito custosa computacionalmente. Neste trabalho é avaliado o ganho de tempo computacional ao **construir as restrições da SAR a priori**, ou seja, obter as restrições da SAR antes de iniciar o processo de convergência da PDDE, evitando assim o processo iterativo entre a PDDE e o subproblema da SAR. Para isso é necessário discretizar as variáveis de estado do subproblema da SAR, que, para o caso não condicionado, objeto do trabalho, são os níveis de armazenamento dos reservatórios. Para agilizar a construção das restrições da SAR foram utilizadas técnicas de processamento paralelo.

1.3 Relevância do trabalho

O modelo Newave 9.[9], desenvolvido pelo CEPEL, é um programa computacional utilizado para o planejamento da operação de médio/longo prazo e para o planejamento da expansão do setor elétrico. Este modelo é utilizado de forma oficial pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para coordenação da operação do sistema e pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) para formação do preço da energia. É utilizado também pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o planejamento da expansão do setor elétrico, Leilão de novas usinas e para garantia física de energia.

Este trabalho propõe aprimoramentos em uma das alternativas existentes no modelo Newave para tratar a questão de aversão a risco, que é o uso da superfície de aversão ao risco (SAR). Esta metodologia é mais intuitiva para o operador do sistema e para os agentes envolvidos na operação que a metodologia CVAR, pois nesta metodologia são inseridas restrições de níveis mínimos operativos para os reservatórios do sistema, visando aumentar a segurança operativa, diminuindo os riscos de não atendimento a demanda do sistema. Enquanto na metodologia CVAR é necessário utilizar parâmetros que não são tão intuitivos de serem obtidos.

1.4 Etapas de desenvolvimento e estrutura do trabalho

Previamente ao desenvolvimento dessa dissertação, o autor trabalhou na implementação da metodologia original da SAR no modelo NEWAVE, que foi avaliada pela CPAMP durante o ano de 2013 9.[10]. Já durante a realização desse trabalho, foi feita uma revisão geral na metodologia de construção da SAR, verificando os processos de criação das restrições e estudados com detalhes os problemas resolvidos durante a PDDE e durante o subproblema da SAR. Foram feitos também estudos para avaliar os tipos de restrições de SAR criadas e a compatibilização das penalidades utilizadas em relação ao seu significado mais intuitivo. Em seguida, desenvolveram-se dois procedimentos propostos neste trabalho.

No capítulo 2 será feita uma descrição do sistema hidrotérmico e as dificuldades no planejamento da operação energética; no capítulo 3 será feita uma revisão bibliográfica sobre aversão a risco em sistemas hidrotérmicos de energia; no capítulo 4 será descrito o modelo Newave, utilizado para o planejamento da expansão, operação e formação de preço no Brasil; no capítulo 5 será descrita a metodologia concebida originalmente para a SAR e no Capítulo 6 elaboradas as propostas para aperfeiçoamento dessa metodologia. No capítulo 7 serão discutidos os resultados obtidos com esta nova metodologia e no capítulo 8 apresentadas as conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros a este trabalho.

2. PLANEJAMENTO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

O Brasil é um país com dimensões continentais, onde a geração de energia elétrica é predominantemente hidráulica. Este tipo de geração geralmente se encontra longe dos grandes centros de consumo, sendo necessários grandes troncos de transmissão para escoar esta energia.

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, em sua forma mais tradicional, tem como objetivo estabelecer metas de geração térmica e hidráulica com o objetivo de atender à demanda de energia com segurança e buscando minimizar os custos de geração. Porém o planejamento energético desses sistemas apresenta grandes dificuldades devido as incertezas nas afluências aos aproveitamentos hidrelétricos. O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos é de bastante complexo pois apresenta as seguintes características:

- **Acoplamento temporal:** A decisão tomada em determinado estágio influencia a operação dos estágios seguintes, pois a decisão de gerar em uma usina hidráulica afeta a quantidade de energia armazenada nos reservatórios nos períodos seguintes.
- **Acoplamento espacial:** A geração de uma usina hidráulica pode afetar a geração de outras usinas, como por exemplo, usinas que estão a jusante em uma mesma cascata. Além disso, as gerações das usinas hidráulicas e térmicas devem ser coordenadas para atender à demanda no mesmo instante, visto que até hoje a energia não pode ser estocada em grandes quantidades de forma econômica.
- **Estocasticidade:** Existem incertezas no montante de energia afluente no futuro, que varia sazonalmente e regionalmente e podem apresentar períodos secos de longa duração.

Se a decisão operativa tomada em um determinado período for a utilização de usinas hidráulicas com o objetivo de minimizar os custos de combustíveis associados às usinas térmicas, e no futuro ocorrer uma seca, será necessário despachar térmicas com custos mais elevados ou o sistema pode apresentar déficit de energia. Se por outro lado a decisão operativa for utilizar as usinas térmicas e manter os níveis dos reservatórios elevados e

nos períodos futuros ocorrer uma grande afluência, será necessário verter nos reservatórios, o que é uma desperdício de energia para o sistema, que pode gerar uma perda financeira no futuro. O diagrama de decisões é apresentado na figura 2.1 e mostra a complexidade do planejamento de sistemas hidrotérmicos.

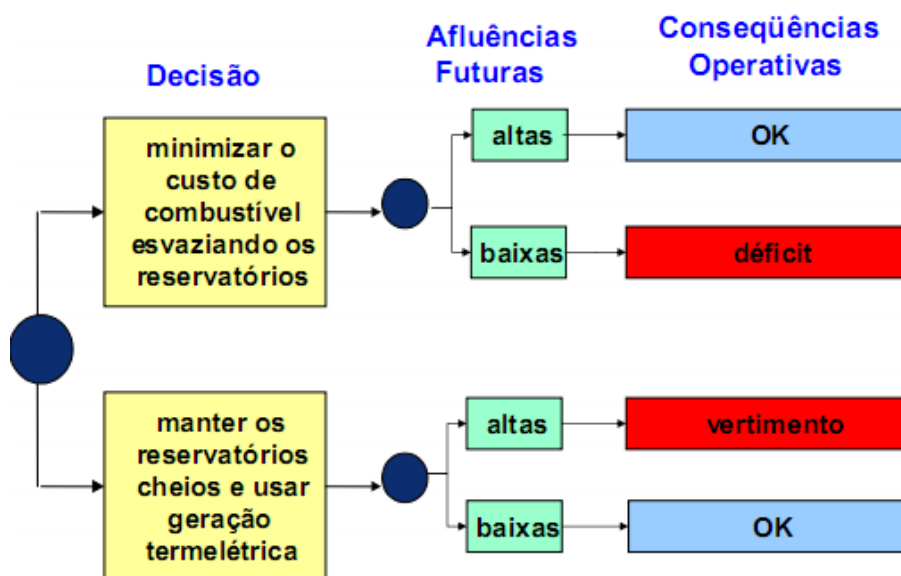


Figura 2.1 - Conseqüências da decisão operativa 9.[11].

O problema de planejamento no Brasil é complexo, devido ao grande número de usinas hidráulicas e térmicas, e à incerteza nas afluências. Devido a essa complexidade de operação e a necessidade de haver uma operação coordenada, o problema de planejamento é executado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) com o auxílio de modelos computacionais com diferentes horizontes e diferentes níveis de detalhamento. A cadeia de modelos utilizados no planejamento do sistema elétrico, desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), é apresentada na figura 2.2.

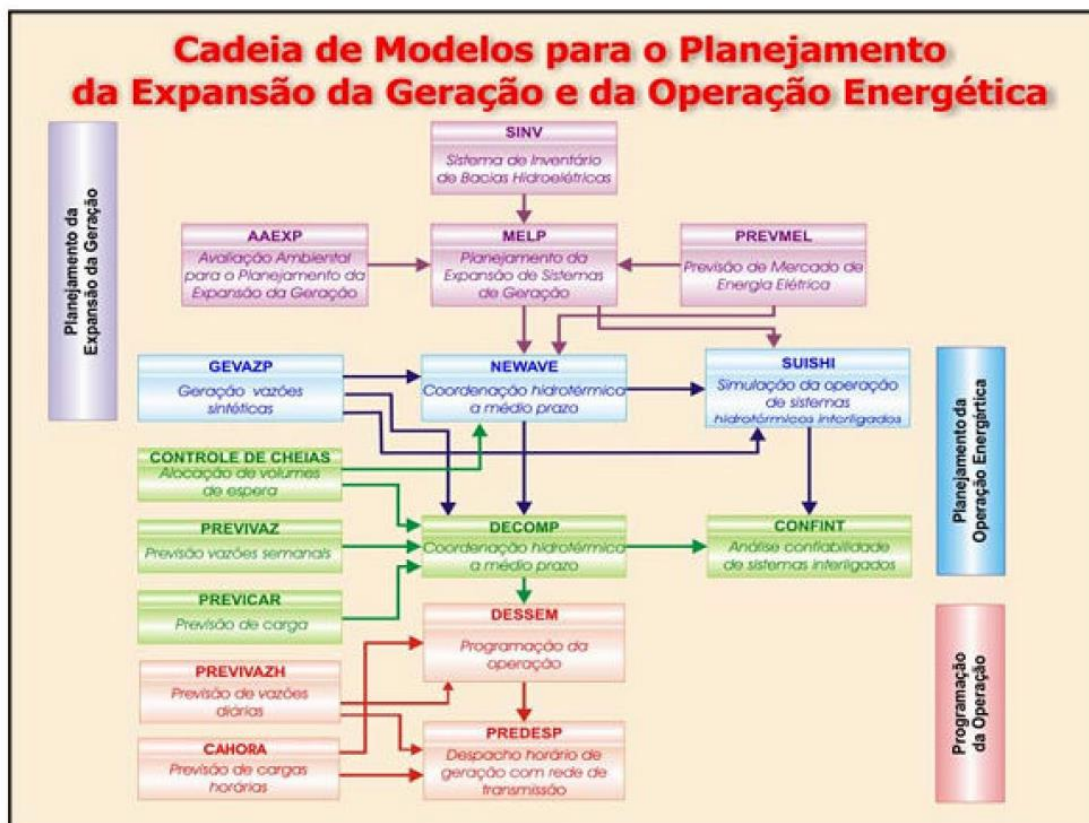


Figura 2.2 – Cadeia de modelos utilizados no planejamento

O modelo Newave é utilizado para o planejamento da operação de longo/médio prazo e como na aplicação do programa mensal de operação (PMO) conduzida pelo ONS e de cálculo do preço de liquidação de diferenças (PLD) conduzidas pela CCEE, e para o planejamento da expansão do setor elétrico. Até dezembro de 2015 eram considerados quatro reservatórios equivalentes de energia e quatro subsistemas/submercados, passando para nove reservatórios equivalentes de energia 9.[12] em janeiro de 2016. O horizonte de planejamento da operação é de cinco anos com discretização mensal. O objetivo desse modelo é construir uma política operativa¹, com a qual é possível obter metas de geração hidroelétrica e termoelétrica para cada subsistema mensalmente, quando se simula o SIN para determinados cenários de afluência. Além disso, essa função de custo futuro que representa a política ótima de operação será utilizada pelos demais modelos da cadeia de

¹ Constituída por uma função de custo futuro multivariada, uma para cada período de tempo do planejamento.

planejamento, que determinarão de forma mais detalhada a geração de cada usina do sistema.

2.1 Planejamento com aversão a risco

Em 2001, devido ao racionamento de energia elétrica, o Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico Brasileiro propôs uma metodologia para consideração da aversão a risco no cálculo da política ótima de operação, na qual são definidas metas mensais de armazenamentos mínimos (curva de aversão a risco – CAR) para cada subsistema, que atualmente são denominados pelo termo “Reservatório equivalente de energia (REE)”. O objetivo dessa metodologia era aumentar o despacho de usinas térmicas para garantir a manutenção dos níveis de armazenamento dos reservatórios. Esta metodologia foi utilizada no modelo Newave entre 2004 e setembro de 2013, porém, foi observado que a mesma não conseguia fornecer adequadamente a sinalização necessária para o aumento do despacho das usinas térmicas.

Surgiu assim a necessidade de desenvolver e implementar metodologias alternativas para a incorporação de mecanismos de aversão a risco internamente aos programas computacionais para estudos energéticos e formação de preço, o que foi feito durante o ano de 2013, a partir da Resolução no 3/2013 do CNPE – Conselho Nacional de Política Energética 9.[6]. Com isto, visou-se a elevação da segurança do sistema, com o reflexo correspondente no valor do preço de liquidação das diferenças (PLD) utilizado para o mercado de curto prazo.

Um destes mecanismos de aversão a risco alternativo à CAR é denominado de Superfície de Aversão a Risco (SAR). Esta metodologia foi originalmente apresentada em 9.[8] e uma análise desta proposta, conduzida pelo CEPEL, verificou a necessidade de aprimorá-la e estendê-la para viabilizar a sua aplicação no modelo NEWAVE 9.[13]. Durante o ano de 2013, foram realizados estudos mais aprofundados sobre esta metodologia do ponto de vista teórico, obtendo-se a estratégia de solução que foi finalmente implementada no modelo NEWAVE. Outra metodologia também implementada no modelo Newave durante o ano de 2013 é a denominada Conditional Value at Risk (CVaR), segundo uma abordagem mais direta desenvolvida simultaneamente em 9.[14],9.[15], ambas baseadas na metodologia proposta originalmente em 9.[7]. O CVaR está oficialmente em uso deste outubro de 2013 no planejamento da operação energética e no cálculo do preço de

liquidação de diferença de energia elétrica no mercado de curto-prazo. Outras metodologias alternativas de aversão ao risco também podem ser utilizadas no planejamento de sistemas hidrotérmicos, como a calibração na penalização ao corte de carga e restrições probabilísticas, que serão vistas com mais detalhes no capítulo 3.

3. AVERSÃO A RISCO NO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO HIDROTÉRMICO

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica de alguns dos procedimentos para aversão a risco utilizados na literatura de planejamento hidrotérmico, como: penalização ao corte de carga; uso de curvas-guias para a operação de reservatórios (“Rule Curves”, no termo em inglês); restrições probabilísticas e adoção da medida *conditional Value-at-Risk* (CVAR).

3.1 Penalização ao corte de carga

A ideia de especificar um risco de déficit para o sistema é antiga: diferentes abordagens já foram propostas na literatura para introduzir aversão a risco no planejamento da operação. Como há uma forte ligação entre o risco de déficit e o custo déficit, um procedimento iterativo é proposto em 9.[16] para calibrar o custo de déficit como função de um nível de risco desejado. Nessa proposta, o problema de otimização é resolvido considerando um determinado valor para o custo de déficit. Caso não seja possível atender um determinado nível de confiabilidade desejado para o sistema, eleva-se o valor do custo de déficit e a otimização do sistema é executada novamente. Este processo é executado até seja possível atender o sistema com o nível de confiabilidade desejado. Pode não ser possível com este procedimento atingir níveis de risco desejados, pois os recursos podem ser insuficientes. Este procedimento é muito custoso computacionalmente já que o processo é executado várias vezes até ser atendido o nível de risco desejado.

3.2 Uso de curvas-guias

Outra alternativa que vem sendo utilizada ao longo do tempo na literatura para garantir a segurança de suprimento é a adoção das chamadas curvas-guias para a operação do sistema. As curvas guias são níveis metas para os reservatórios do sistema com o objetivo da operação não permitir que os valores para o armazenamentos fiquem abaixo desses níveis, para minimizar a ocorrência de níveis mínimos que com mais chance resultam em déficits. Em 9.[3] a construção da curva guia é feita considerando a série mais crítica do histórico e mantendo a geração complementar, ou seja, geração térmica, constante durante todos os períodos do planejamento. Os níveis dos reservatórios obtidos a partir dessa operação irão compor a curva guia. Em 9.[4] a curva guia é construída considerando que toda geração térmica está no máximo e o restante de energia necessária para carga firme

do sistema com as afluições históricas será atendida pela geração hidráulica do sistema. O mesmo conceito é utilizado em 9.[5], onde são introduzidos conceitos de período crítico e operação crítica para o sistema. Em 9.[5] é detalhada ainda uma proposta de metodologia para construção da curva guia. Em 9.[2] também é utilizado o conceito de curva guia, porém neste artigo não é detalhado o procedimento utilizado para obtenção desta curva. Ainda que a ideia de utilizar níveis mínimos de armazenamentos seja interessante devido ao sentido intuitivo para o operador do sistema, sua consideração de forma estocástica não é bem estabelecida na literatura.

3.2.1. Curva de aversão a risco (CAR)

A forma tradicional de planejamento da operação com curvas guias é estabelecendo níveis mínimos para os armazenamentos dos reservatórios equivalentes do sistema – seja em água ou em energia – durante um dado horizonte. Até setembro de 2013 esta era a metodologia utilizada oficialmente no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro – denominada “Curva de Aversão a Risco (CAR)” – quando foi substituída pela metodologia CVaR 9.[14]. Esta curva de aversão a risco era uma curva guia utilizado para o sistema brasileiro e era obtida por uma metodologia de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema (ONS) 9.[17]. O inconveniente principal da utilização de curva guia individual é que a operação interligada entre os reservatórios não é levada em consideração. Como pode haver intercambio de energia entre os diferentes reservatórios equivalentes de energia – que estão sujeitos a diferentes condições hidrológicas ao longo do ano – o nível mínimo seguro em um dado reservatório equivalente deveria levar em consideração os armazenamentos nos demais reservatórios;

3.2.2. SAR

A superfície de Aversão a Risco (SAR) é um aprimoramento da Curva de Aversão a Risco (CAR), onde ao invés de serem consideradas curvas guias para cada reservatório equivalente individualmente, as restrições da SAR levam em consideração a combinação dos armazenamentos de cada reservatório equivalente do sistema. O esboço original desta foi apresentada em 9.[8], porém não foi apresentado como seria a formulação do problema adicional para construção das restrições SAR e como seriam calculados os cortes de Benders. Além disso, a dependência das afluições aos reservatórios, que é fundamental para avaliar o desempenho do sistema principalmente em períodos secos, não foi

considerada. Uma análise dessa proposta de SAR e alguns aperfeiçoamentos a ela foram propostas em 9.[13].

Em relação ao segundo inconveniente das curvas guias individuais, em casos multivariados, a princípio parece bastante difícil obter a superfície de aversão a risco completa, não somente devido as suas dimensões elevadas, como também pela variação de alguns termos não lineares na formulação do problema que consideram a variação da geração com a altura do reservatório, como descrito em 9.[18]. Entretanto, uma interessante descoberta do trabalho dessa dissertação é que, apesar da curva em si não poder ser descrita de forma completa *a priori*, a aproximação da curva obtida com um procedimento *a priori* forneceu resultados para a política de operação sem perda sensível de qualidade, quando comparados com o procedimento *a posteriori* que havia sido implementado anteriormente para a SAR 9.[19].

3.3 Restrições probabilísticas

As restrições probabilísticas são restrições impostas à operação do sistema onde o objetivo é atender a um dado requisito com uma probabilidade determinada. Em 9.[20] são incluídas restrições probabilísticas para a solução do sistema considerando um determinado valor de risco de déficit. Naquele artigo, para obtenção do nível de proteção desejado são inseridas para cada período de planejamento restrições probabilísticas com o objetivo de atender à carga do sistema com um determinado nível de confiabilidade ao final do período de estudo. No artigo é descrito como é obtido o valor de probabilidade para cada período do estudo. Em 9.[21] são consideradas restrições probabilísticas para o sistema brasileiro, onde o objetivo é que a probabilidade do armazenamento ficar abaixo de um armazenamento crítico deve ser inferior a um dado valor. Essa metodologia é menos avessa ao risco que a CAR e a SAR, pois as restrições não devem ser atendidas na sua totalidade e sim um dado percentual das restrições. Uma desvantagem dessa metodologia é o custo computacional elevado para obter a probabilidade de atendimento.

3.4 CVaR

Tradicionalmente, o objetivo da PDDE aplicada ao planejamento de sistemas hidrotérmicos é encontrar a solução ótima para o sistema que minimiza o custo esperado de operação. Porém, vêm sendo propostas alternativas para aumentar o nível de segurança do sistema: em 9.[22] e 9.[23] são propostas a inclusão da metodologia CVaR,

porém nestes dois trabalhos é necessário uma variável adicional u_t em cada estágio t do problema de otimização. Esta variável corresponde a uma estimativa para o valor do VaR do estágio seguinte em diante, que é utilizada durante o processo de otimização para identificar os cenários que devem ser considerados para o cálculo da parcela da função objetivo e dos cortes de Benders referente à modelagem do $CVaR$. Em 9.[14] e 9.[15] foram propostas, de forma independente, uma aplicação do $CVaR$ sem a necessidade de uma variável de estado adicional aos estudos de planejamento hidrotérmico. Nesses trabalhos, para cada estágio é minimizada o subproblema para cada K possíveis realizações de afluições e assim obtida a medida $CVaR$ dos αK cenários mais caros, (onde α é um parâmetro) e em seguida calculados os cortes de Benders para a função objetivo sem a inclusão de uma nova variável de estado.

Em 9.[24] é proposta uma aplicação de $CVaR$ para o sistema elétrico brasileiro, porém ao invés de ser aplicada a metodologia do $CVaR$ ao custo de operação a metodologia é aplicada ao déficit de carga do sistema. Nesse artigo é proposta um critério de confiabilidade explícito através da representação de uma restrição que impõe que a medida de risco $CVaR$ associada aos déficits de energia deve estar limitada à um máximo valor, de acordo com critério de segurança pré-determinado pelo planejador do sistema. O algoritmo proposto é baseado em um processo de ajuste da penalização associada à restrição de limite do $CVaR$.

4. PLANEJAMENTO DE MÉDIO/LONGO PRAZO DO SISTEMA BRASILEIRO

O planejamento da operação de longo/médio prazo é realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e, devido à grande dimensão do sistema e a sua complexidade, este é realizado com o auxílio de programa computacional Newave desenvolvido pelo CEPEL. Neste modelo devido à representação acurada das incertezas nas afluições e ao extenso horizonte de estudo, as usinas de cada subsistema são agregadas e transformadas em reservatórios equivalentes de energia (REE)9.[4],9.[25]. Atualmente o modelo permite que haja vários REEs em cada subsistema9.[12], como uma extensão do que havia sido proposto anteriormente em 9.[26].

4.1 Modelo Newave

O modelo Newave é utilizado tanto no planejamento da operação do sistema, como no cálculo do preço da energia e no planejamento da expansão do sistema elétrico. O modelo é dividido em quatro módulos:

- **Calculo dos reservatórios equivalentes de energia:** Neste módulo são calculados as grandezas dos reservatórios equivalentes de energia, onde as usinas de cada região são transformadas em um único reservatório com as características das usinas que as contem. Esta metodologia pode ser vista com mais detalhes em 9.[25].
- **Geração de cenários de afluição:** Estimam-se os parâmetros do modelo estocástico, PAR(p) que será visto com mais detalhes no capítulo 4.2, e geram-se séries sintéticas de energias naturais afluentes que serão utilizadas no módulo de cálculo da política de operação hidrotérmica e para análise de desempenho do módulo de simulação da operação. Esta metodologia pode ser vista em mais detalhes em 9.[27] e 9.[28].
- **Calculo da política de operação hidrotérmica:** Determina a política de operação ótima para o sistema. Para isto é utilizada a técnica de programação dinâmica dual estocástica (PDDE) 9.[27], 9.[29],9.[9], onde é construída uma função de custo futuro que será utilizada para valorar a água nos reservatórios ao longo do tempo. Esta função auxilia na definição de metas mensais de geração para as usinas

hidroelétricas e termoeleétricas e serve como condição de contorno para os demais modelos da cadeia 9.[30] .

- **Simulação da operação:** Simula a operação ao longo do período de planejamento, para diversos cenários de afluência utilizando o conjunto de funções de custo futuro calculadas no módulo de cálculo da política. Com isso, são obtidos índices de desempenho, como custo de operação, risco de déficit, custos marginais de operação, intercâmbio de energia, geração hidráulica e geração térmica.

4.2 Módulo de geração de cenários afluências

A representação da afluência é estocástica, pois não são conhecidos os seus valores para os períodos futuros. A incerteza nas afluências é representada por uma árvore de cenários conforme figura 4.1, 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 com as propriedades estatísticas obtidas pelo histórico e que são preservadas para a construção das árvore 9.[28].

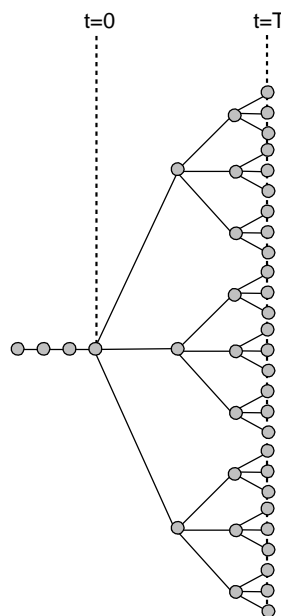


Figura 4.1 – Representação da árvore de cenários

Conceitualmente, o Newave utiliza uma estrutura de árvore para representar as afluências, com NLEQ aberturas, que são possibilidades de realização das afluências (ruídos), para cada período. Para obter o valor final de energia afluente a ser utilizada no problema de

otimização é utilizado um modelo auto regressivo periódico de ordem p , ou seja, o valor obtido para a variável aleatória em um determinado período é influenciado pelos p períodos anteriores [27]. Assim a afluência em um determinado período, é o valor obtido pela soma da influência de cada período anterior multiplicado por um coeficiente que relaciona a influência dos períodos anteriores ao período p , mais um ruído aleatório. Como é impossível percorrer a árvore por completo, para a construção dos cenários visitados para a PDDE no passo *forward* é sorteado apenas um valor para o ruído para cada série e cada período. Para as afluências utilizadas no passo *backward* são utilizadas as NLEQ possibilidades de afluência para cada série e cada período. A figura 4.2 ilustra essa estrutura de cenários *forward* e *backward* do modelo.

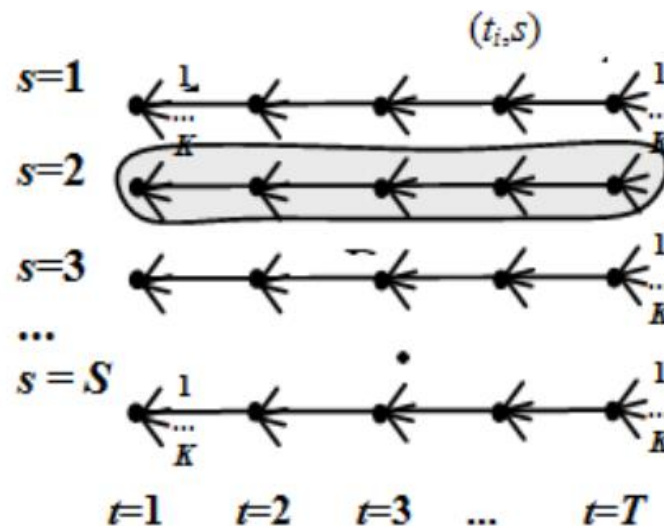


Figura 4.2 - Árvore de cenários utilizada no Newave.

Atualmente é utilizada a técnica de amostragem seletiva [28] para obtenção dos cenários a serem visitados nos passos backward e forward. Com esta metodologia é possível reduzir a cardinalidade da árvore de afluências e apenas uma parte da árvore completa, que são todas as possíveis realizações de afluências, é visitada.

4.3 Formulação do Problema

Após realizada a decomposição do problema, o modelo Newave resolve, para cada período e para cenário de afluência, um problema de otimização com o objetivo de minimizar a soma do custo presente mais o custo futuro de operação. O custo presente

representa o custo de geração de usinas térmicas e o custo por eventuais cortes de carga. O custo futuro representa o valor esperado de operação no futuro, em função dos armazenamentos finais e as afluições passadas aos reservatórios equivalentes de energia, e que incorpora um termo referente ao CVaR (vide seção 3.4). A formulação matemática simplificada^{1,2} do subproblema para cada período e cenário de afluição é representada a seguir.

Para não carregar a notação, o índice do cenário foi suprimido, ficando subentendido que todas as variáveis de decisão são correspondentes ao nó correspondente ao subproblema do passo *forward* ou *backward* da PDDE. Os únicos dados que são específicos por cenário são as energias afluentes aos REEs, além do vetor de afluições passadas para a série *forward* associada ao cenário.

Minimize:

$$FO_t = \min \sum_{isbm=1}^{nsbm} \sum_{ipat=1}^{npat} \left(\sum_{j \in TCLSIS^{isbm}} C^j GT_{t,ipat}^j + CDEF(DEF_{t,ipat}^{isbm}) \right) + CF_{t+1} \quad (1)$$

Onde:

$nsbm$	Número de subsistemas/submercados
$npat$	Número de patamares de carga
$iree$	Índice para o reservatório equivalente de energia
$isbm$	Índice para o subsistema/submercado
$ipat$	Índice do patamar de deficit
t	Índice para o período de tempo (estágio) do problema de planejamento da operação hidrotérmica
$TCLSIS^{isbm}$	Conjunto de índices das usinas térmicas pertencentes ao submercado $isbm$
CT^j	Custo de operação associado a classe térmica T
$GT_{t,ipat}^j$	Geração térmica da classe térmica T no patamar de carga $ipat$ e estágio t

¹ Algumas restrições como despacho antecipado de usinas GNL, equação de nó, entre outras foram suprimidas pois não são essenciais para o entendimento da metodologia do trabalho.

² Por simplicidade foram omitidos os custos de penalização para as variáveis de folga.

$CDEF$	Custo de déficit para um corte de carga no subsistema/submercado isbm. Este custo é uma função linear por partes, com derivadas crescentes
$DEF_{t,ipat}^{isbm}$	Déficit no subsistema/submercado isbm, no patamar de carga ipat, no estágio t
CF_{t+1}	Valor esperado do custo futuro ao final do período t

Sujeito a

Balanzo hídrico controlável

Uma equação de balanço hídrico controlável para cada reservatório equivalente de energia *iree*:

$$EARM_{t+1}^{iree} + \left(\sum_{ipat=1}^{npat} GH_{t,ipat}^{iree} \right) + EVERT_t^{iree} + DSV C_t^{iree} \quad (2)$$

$$= EARM_t^{iree} + FC_t^{iree} \gamma_t^{iree} EAF_t^{iree} - EVAP_t^{iree}$$

Onde:

$EARM_{t+1}^{iree}$	Energia armazenada no REE iree no início do estágio t
$GH_{t,ipat}^{iree}$	Geração hidráulica controlável do REE iree, no patamar ipat e estágio t
$EVERT_t^{iree}$	Energia vertida pelo REE iree no estágio t
FC_t^{iree}	Fator de correção da energia controlável do REE iree e estágio t
γ_t^{iree}	Fator de separação da energia afluyente controlável da energia afluyente total do REE iree, no estágio t
EAF_t^{iree}	Energia afluyente ao REE iree no estágio t
$EVAP_t^{iree}$	Energia evaporada do REE iree no estágio t

Atendimento à demanda

Uma equação de atendimento à demanda para cada submercado/subsistema $isbm$ e patamar $ipat$.

$$\begin{aligned} \sum_{iree \in isbm} [GH_{t,ipat}^{iree} + GFIOI_t^{iree} fp_{ipat}] + \left(\sum_{j \in TCLSIS^{isbm}} GT_{t,ipat}^j \right) + DEF_{t,ipat}^{isbm} \quad (3) \\ + \sum_{jsbm \in \Omega_{isbm}} INT_{t,ipat}^{jsbm,isbm} - EXC_{t,ipat}^{isbm} = \\ \left[(MERC_{t,ipat}^{isbm} + CADIC_{t,ipat}^{isbm}) - PEQUSI_t^{isbm} - \sum_{iree \in isbm} SUBMOT_t^{iree} \right. \\ \left. - \sum_{j \in TCLSIS^{isbm}} GTMIN_{t,ipat}^j \right] \times fp_{ipat} \end{aligned}$$

Onde:

$GFIOI_t^{iree}$	Geração hidráulica fio d'água do REE iree no estágio t
fp_{ipat}	Duração do patamar de carga ipat no período t
Ω_{isbm}	Conjunto de índices de submercados com intercâmbio ao submercado isbm
$INT_{t,ipat}^{jsbm,isbm}$	Intercâmbio do subsistema/submercado isbm no patamar de carga ipat e estágio t
$EXC_{t,ipat}^{isbm}$	Excesso de energia no subsistema/submercado isbm no patamar de carga ipat e estágio t
$MERC_{t,ipat}^{isbm}$	Mercado a ser atendido no subsistema/submercado isbm patamar de carga ipat e estágio t
$GTMIN_{t,ipat}^j$	Geração mínima na classe térmica T no estágio t
$CADIC_{t,ipat}^{isbm}$	Cargas adicionais ao subsistema/submercado isbm no patamar de carga ipat do estágio t
$PEQUSI_t^{isbm}$	Geração proveniente das Pequenas Centrais Hidroelétricas no subsistema/submercado isbm, estágio t (constante ao longo de todos os patamares)
$SUBMOT_t^{iree}$	Geração proveniente das usinas submotorizadas no subsistema/submercado isbm e estágio t (constante ao longo de todos os patamares)

Geração hidráulica máxima

Uma equação de geração hidráulica máxima para cada reservatório equivalente de energia *iree*

$$GH_{t,ipat}^{iree} + GFIO L_t^{iree} f p_{t,ipat} \leq GHMAX(EARM_t^{iree})_t^{iree} f p_{t,ipat} \quad (4)$$

Onde:

$GHMAX_t^{iree}$ Geração hidráulica máxima obtida pela parábola de correção de GHMAX do REE *iree*, como função da energia armazenada $EARM_t^{iree}$

Vertimento a fio d'água

O vertimento a fio d'água é representado por equações lineares por partes utilizando a metodologia MARS 9.[31]. Portanto, há uma equação de vertimento para usinas a fio d'água para cada reservatório equivalente de energia *iree* e cada segmento de reta *imars* do modelo MARS.

$$VERTF_t^{iree} + am_t^{iree,imars} DSVF_t^{iree} \geq am_t^{iree,imars} [(1 - \gamma_t^{iree}) EAF_t^{iree}] + bm_t^{iree,imars} \quad (5)$$

Onde:

$VERTF_t^{iree}$ Perda de energia a fio d'água do REE *iree* no estágio t

$am_t^{iree,imars}$ Coeficiente linear da equação do MARS *imars* para o REE *iree* no estágio t

$bm_t^{iree,imars}$ Termo independente da equação do MARS *imars* para o REE *iree* no estágio t

$DSVF_t^{iree}$ Energia a fio d'água desviada do REE *iree* no início do estágio t

Balanço hídrico fio d'água

Uma equação de balanço hídrico a fio d'água por reservatório equivalente de energia *iree*

$$GFIOI_t^{iree} + VERTF_t^{iree} + DSVF_t^{iree} = (1 - \gamma_t^{iree})EAF_t^{iree} \quad (6)$$

Atendimento à Meta de Vazão Mínima

Uma equação de atendimento a meta de vazão mínima por reservatório equivalente de energia *iree*

$$GH_t^{iree} + EVERT_t^{iree} + \delta evmin_t^{iree} \geq MEVMIN_t^{iree} \quad (7)$$

Onde:

$\delta evmin_t^{iree}$ Variável de folga da equação de meta vazão mínima a ser atendida pelo REE *iree* no estágio t

$MEVMIN_t^{iree}$ Meta de vazão mínima a ser atendida pelo REE *iree* no estágio t

Atendimento à Meta Desvio Controlável

Uma equação de atendimento a meta de desvio controlável por reservatório equivalente de energia *iree*

$$DSVC_t^{iree} + \delta dsvct^{iree} = MDSVC_t^{iree} \quad (8)$$

Onde:

$\delta dsvct^{iree}$ Variável de folga da equação de meta desvio controlável a ser atendida pelo REE *iree* no estágio t

$MDSVC_t^{iree}$ Meta de desvio controlável a ser atendida pelo REE *iree* no estágio t

Atendimento à Meta Desvio Fio D'água

Uma equação de atendimento a desvio fio d'água para cada reservatório equivalente de energia *iree*

$$DSVF_t^{iree} + \delta dsvft^{iree} = MDSVF_t^{iree} \quad (9)$$

$\delta dsvf_t^{iree}$	Variável de folga da equação de meta desvio fio d'água a ser atendida pelo REE iree no estágio t
$MDSVF_t^{iree}$	Meta de desvio fio d'água a ser atendida pelo REE iree no estágio t

Cortes da função de custo futuro

Uma equação para cada corte $icor$ da função de custo futuro ao final do período t :

$$CF_{t+1} - \sum_{iree=1}^{nree} \pi_{V t+1}^{iree, icor} EARM_{t+1}^{iree} \geq RHS_{t+1}^{icor} + \sum_{iree=1}^{nree} \sum_{K=1}^p \pi_{Ak t+1}^{iree, icor} EAF_{t+1-j}^{iree} \quad (10)$$

Onde:

$\pi_{V t}^{iree, icor}$	Coefficiente associado ao armazenamento REE iree do corte $icor$ construído no estágio t
RHS_t^{icor}	Temo independente do corte de Benders $icor$ construído no estágio t
$\pi_{Ak t}^{iree, icor}$	Coefficiente associado a j -ésima afluência passada do REE iree do corte $icor$ construído no estágio t

4.4 Estratégia de Solução

No modelo Newave, o problema de planejamento da operação energética de médio prazo é representado por um problema de programação estocástica linear multi-estágio. A técnica utilizada para a solução é a Programação Dinâmica Dual Estocástica 9.[27],9.[29],9.[9], que é uma extensão, para o caso amostral, da decomposição de Benders multi-estágio proposta em 9.[32].

A solução do problema de planejamento relacionado à árvore completa de afluência exigiria a solução de um problema de otimização para cada nó. A quantidade de problemas a serem resolvidos para solução da árvore completa é inviável do ponto de vista computacional. Portanto para a solução são aplicadas técnicas para contornar este problema de dimensionalidade e evitar percorrer a arvore completa.. As S séries de afluências a serem visitadas são selecionadas através da técnica de amostragem seletiva9.[28]. O processo de resolução consiste em percorrer essas em duas recursões:

- **Passo forward** : Do estágio 1 a T, onde serão gerados estados para os quais a função de custo futuro será avaliada.

- **Passo backward** : Do estágio T ao 1, resolvendo-se em cada nó (t,s), os subproblemas referentes às K realizações do estágio que compõem a árvore completa. Ao longo desse processo, constroem-se cortes de benders para aproximar a FCF de cada estágio.

4.4.1. Cortes de Benders

Os cortes de Benders são aproximações por séries de Taylor de ordem 1 para função de custo futuro. O corte é uma linearização por parte da função de custo futuro em função das variáveis de estado do sistema e são inseridas no problema de otimização como a seguinte restrição:

$$CF_{t+1} - \sum_{iree=1}^{nree} \pi_{v_{t+1}}^{iree,icor} EARM_{t+1}^{iree} \geq RHS_{t+1}^{icor} + \sum_{iree=1}^{nree} \sum_{k=1}^p \pi_{Ak_{t+1}}^{iree,icor} EAF_{t+1-j}^{iree} \quad (11)$$

Os coeficientes $\pi_{v_{t+1}}^{iree,icor}$ que é o coeficiente do corte em relação ao armazenamento e $\pi_{Ak_{t+1}}^{iree,icor}$ que é o coeficiente dos cortes em função das afluições, são calculados considerando as variáveis duais do problema de otimização da seguinte forma:

$$\pi_{v_{t+1}}^{iree} = \frac{\partial FO_{t+1}}{\partial EARM_{t+1}^{iree}} = \sum_{i=1}^{NREST} \frac{\partial FO_{t+1}}{\partial REST_{t,i}} \times \frac{\partial REST_{t,i}}{\partial EARM_{t+1}^{iree}} \quad (12)$$

Que é a variação do custo futuro em relação ao armazenamento

$$\pi_{Ak,t+1}^{iree} = \frac{\partial FO_{t+1}}{\partial EAF_{t-k}^{iree}} = \sum_{i=1}^{NREST} \frac{\partial FO_{t+1}}{\partial REST_{t,i}} \times \frac{\partial REST_{t,i}}{\partial EAF_{t-k}^{iree}} \quad (13)$$

Que é a variação do custo futuro em função das afluições passadas

$$RHS_{t+1} = FO_{t+1} - \sum_{iree=1}^{nree} \pi_{v_{t+1}}^{iree} EARM_{t+1}^{iree*} - \sum_{iree=1}^{nree} \sum_{k=1}^p \pi_{Ak,t+1}^{iree} EAF_{t-k}^{iree*} \quad (14)$$

Onde:

$NREST$ Número de restrições do problema

p Ordem do modelo auto regressivo periódico

$EARM_{t+1}^{iree*}$ Estado de armazenamento para o qual o corte foi construído

EAF_{t-k}^{iree*} Estado de afluência para o qual o corte foi construído

5. SUPERFÍCIE DE AVERSÃO A RISCO - ESTADO DA ARTE NO BRASIL

De acordo com 9.[19], a superfície de aversão a risco (SAR) estabelece condições limítrofes mínimas para o vetor de energias armazenadas nos reservatórios do sistema, que devem ser alcançadas ao final de um determinado período de tempo (estágio) t , de forma que seja possível operar o sistema ao longo de determinada série de afluições crítica dos estágios $t+1$ a $t+T_{sar}(t)$ sem a ocorrência de déficit, e atendendo aos níveis SAR desejados ao final do estágio $T_{sar}(t)$, onde $T_{sar}(t)$ é calculado de forma a corresponder ao final do período seco de cada ano. Para simplificar a notação, utilizaremos apenas o termo T_{sar} , estando subentendido que ele varia com o valor de t .

Na concepção original implementada, a SAR é construída durante o processo de convergência da PDDE, resolvendo um subproblema de otimização adicional para uma série crítica (subproblema da SAR), utilizando como entrada os valores de armazenamento obtidos pela solução do subproblema do Newave para o período t e observando se houve déficit e foi possível atender o nível meta de armazenamento ao final do período seco $t + T_{sar}$. Caso não seja possível atender este nível meta ou o subproblema apresente déficit, são adicionadas restrições ao problema do Newave com o objetivo de elevar os níveis de armazenamento.

5.1 Hipóteses básicas

A operação determinística do sistema considerando uma série crítica de afluição do período $t+1$ a $t+T_{sar}$, deve atender a dois seguintes requisitos:

- Não ocorrência de déficit ao longo deste cenário, isto é, o sistema deve ser capaz de atender a demanda de energia durante estes períodos com a sua capacidade disponível térmica e hidráulica.
- Obter níveis de armazenamentos superiores a dado nível meta mínimo nos reservatórios do sistema ao final do período T_{sar} para cada reservatório equivalente de energia.

As duas condições acima podem ser inseridas em um problema hidrotérmico determinístico para um determinado cenário de afluições, onde a função objetivo é

minimizar o montante de déficit e com uma restrição adicional para os requisitos mínimos de energia armazenada ao final do horizonte.

A princípio, cada subproblema contém as mesmas restrições de cada estágio do problema do Newave, que é descrito no capítulo 4.3, porém com uma formulação modificada para algumas destas restrições, para emular a operação do sistema em condição de emergência.

São definidas duas versões para este subproblema da SAR:

- caso não condicionado, onde a dependência temporal entre os estágios não é considerada na construção do cenário crítico;
- caso condicionado, onde a dependência temporal entre os estágios é considerada e a construção da superfície de aversão a risco se torna mais complexa.

5.2 Metodologia geral de otimização - SAR construída durante a PDDE

Durante o processo de convergência da PDDE, para cada período t , série de afluição s e abertura ω , é resolvido um problema de otimização e obtidos os valores de armazenamento para cada reservatório equivalente de energia. Esses valores de armazenamento são utilizados como dado de entrada para o subproblema da SAR, que consiste em um problema de otimização determinístico multiperíodo dos períodos $t+1$ até $t+T_{sar}$, onde $t+T_{sar}$ é o final do período seco, para uma determinada série severa de afluição. A função objetivo desse problema é minimizar a soma do custo de déficit com uma possível penalização pelo não atendimento ao nível meta ao final do período $t+T_{sar}$.

Após a resolução deste problema, se houver déficit e/ou não for possível atender o nível meta para esse subproblema, são construídas restrições de viabilidade da SAR, que são introduzidas no subproblema do Newave com o objetivo de elevar o nível de armazenamento dos REE. Em seguida, o problema do Newave é resolvido novamente e obtidos novos valores para armazenamento que são utilizados novamente como dado de entrada para o subproblema da SAR. Esse processo é repetido até que o valor da função objetivo do subproblema da SAR seja igual a zero, quando então passa-se à resolução do subproblema do NEWAVE referente à próxima abertura (cenário) da PDDE. Na figura 1 é apresentado o processo iterativo para construção da superfície de aversão a risco, que

pode ser entendido com uma decomposição de Benders dois estágios entre os subproblemas do Newave e o subproblema da SAR.

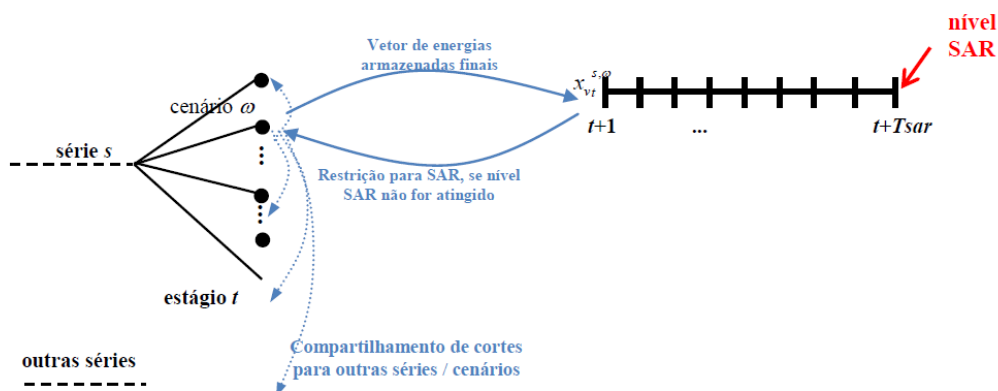


Figura 5.1 – Processo iterativo para construção de superfície de aversão a risco

Esse processo iterativo de construção da superfície de aversão a risco é realizado tanto no passo *forward* quanto no passo *backward* da PDDE e as restrições construídas para uma determinada série de afluência podem ser compartilhadas entre as demais séries.

5.3 Formulação matemática do subproblema da SAR

Neste subproblema, desejamos verificar se a operação obtida para determinado estado/cenário do subproblema do Newave no período t produz condições iniciais para o período $t+1$, de modo que seja possível operar o sistema de $t+1$ a $t+T_{sar}$ para uma série crítica de afluência sem a ocorrência de déficit e atendendo aos requisitos de armazenamento.

A série hidrológica utilizada no subproblema da SAR pode ser condicionada ou não condicionada ao passado. No caso condicionado, a série hidrológica é construída considerando as afluências passadas para cada cenário, já que se assume que estas terão influência no cenário crítico a ser considerado para o futuro. Já no caso não condicionado, essa série crítica pode ser por exemplo, uma determinada série do histórico de vazões.

5.3.1. SAR não condicionada

Uma formulação simplificada para o subproblema da SAR é apresentada abaixo, onde somente as restrições essenciais são incluídas: os grupos de restrições (16) e (17) consistem no balanço hídrico e atendimento a demanda para todas os sistemas e períodos. O conjunto de restrições (18) estabelece o nível mínimo de armazenamento no final do problema determinístico e as inequações (19) e (20) definem os limites para as variáveis.

$$\beta_t = \sum_{t=1}^{T_{sar}} \sum_{isbm=1}^{NSBM} CDEF \times DEF_{\hat{t}+t}^{isbm} + \sum_{iree=1}^{NREE} P_{sar} \times \delta_{sar}^{iree} \quad (15)$$

s. a.

$$EARM_{\hat{t}+t}^{iree} + GH_{\hat{t}+t}^{iree} + EVERT_{\hat{t}+t}^{iree} = EARM_{\hat{t}+t-1}^{iree} + EAF_{\hat{t}+t}^{iree} \quad t = 1, \dots, T_{SAR}^{\hat{t}} \quad (16)$$

$iree = 1, \dots, NREE$

$$GH_{\hat{t}+t}^{iree} + GT_{\hat{t}+t}^{isbm} + \sum_{jsbm \in \Omega_{isbm}} INT_{\hat{t}+t}^{jsbm, isbm} + DEF_{\hat{t}+t}^{isbm} = D_{\hat{t}+t}^{isbm} \quad t = 1, \dots, T_{SAR}^{\hat{t}} \quad (17)$$

$i = 1, \dots, NSBM$

$$EARM_{\hat{t}+t}^{iree} + \delta_{sar}^{iree} \geq EARM_{min}^{iree} \quad i = 1, \dots, NREE \quad (18)$$

$$GH_{\hat{t}+t}^{iree} \leq \overline{GH_{\hat{t}+t}^{iree}}, \quad \underline{EARM_{\hat{t}+t}^{iree}} \leq EARM_{\hat{t}+t}^{iree} \leq \overline{EARM_{\hat{t}+t}^{iree}} \quad t = 1, \dots, T_{SAR}^{\hat{t}} \quad (19)$$

$i = 1, \dots, NREE$

$$GT_{\hat{t}+t}^{isbm} \leq \overline{GT_{\hat{t}+t}^{isbm}}, \quad INT_{\hat{t}+t}^{jsbm, isbm} \leq \overline{INT_{\hat{t}+t}^{jsbm, isbm}} \quad t = 1, \dots, T_{SAR}^{\hat{t}} \quad (20)$$

$i = 1, \dots, NSBM$

O número de reservatórios equivalentes de energia é NREE, e cada REE *iree* tem uma capacidade máxima de geração hidráulica $\overline{GH_{\hat{t}+t}^{iree}}$. O número de submercados é NSBM, e cada submercado *isbm* tem uma capacidade máxima de geração térmica $\overline{GT_{\hat{t}+t}^{isbm}}$. As variáveis $INT_{\hat{t}+t}^{jsbm, isbm}$ denotam o montante de energia que o submercado *jsbm* exporta para cada submercado vizinho *isbm*, identificados pelo conjunto de índices Ω_{isbm} (valores negativos representam importação de energia). As capacidades mínima/máxima de energia física em cada REE são $\underline{EARM_{\hat{t}+t}^{iree}}$ e $\overline{EARM_{\hat{t}+t}^{iree}}$, respectivamente. A afluência para cada REE em cada período de tempo é representada por $EAF_{\hat{t}+t}^{iree}$ e a demanda de energia para cada subsistema é denotada por $D_{\hat{t}+t}^{isbm}$. Finalmente, $DEF_{\hat{t}+t}^{isbm}$ é o montante de corte de

carga (déficit) em cada subsistema/período, e funciona como variável de folga da restrição de atendimento a demanda. $CDEF$ é o custo unitário de déficit e P_{sar} é custo da penalidade associada a violação da restrição de armazenamento mínimo. A função objetivo β é a minimização da soma do custo de déficit com o custo de violações dos níveis meta finais, que idealmente deve ser igual a zero. O objetivo é obter as condições mínimas necessárias para o vetor de armazenamento inicial $EARM_{\hat{t}+t-1}^{iree}$ que produz uma solução ótima igual a zero.

No subproblema da SAR, como é considerado que o sistema está operando em condições de emergência, seria natural considerar que todas as térmicas do sistema estariam operando com sua capacidade máxima para atender a demanda. Porém, por simplicidade, as térmicas são consideradas como variáveis de decisão, mas sem custo na função objetivo. Desta forma a demandar será atendida primeiramente pelas térmicas e em seguida pelas usinas hidráulicas.

Para ilustrar o conceito da SAR, considere um exemplo cujos dados são mostrados na tabela 1, onde, por simplicidade, foram considerados apenas dois REEs, cada um localizado em um subsistema, com intercâmbio entre eles.

Tabela 1 – Exemplo para superfície de aversão a risco para 2 sistemas

	Subsistema 1		Subsistema 2	
	Período $\hat{t}+1$	Período $\hat{t}+2$	Período $\hat{t}+1$	período $\hat{t}+2$
Demanda do subsistema ($D_{\hat{t}+t}^{isbm}$)	50	50	50	50
Afluência ao REE ($EAF_{\hat{t}+t}^{iree}$)	10	5	20	10
Capacidade máxima de geração térmica do subsistema ($\overline{GT}_{\hat{t}+t}^{isbm}$)	10	10	20	20
Capacidade máxima de intercâmbio ($\overline{INT}_{\hat{t}+t}^{jsbm, isbm}$)	10	10	10	10

Pode-se observar que o subsistema 2 tem melhores condições, uma vez que apresenta maior capacidade de geração térmica e expectativa de afluência em relação ao sistema 1. A superfície de aversão a risco correspondente a essas condições é apresentada na figura 5.2.

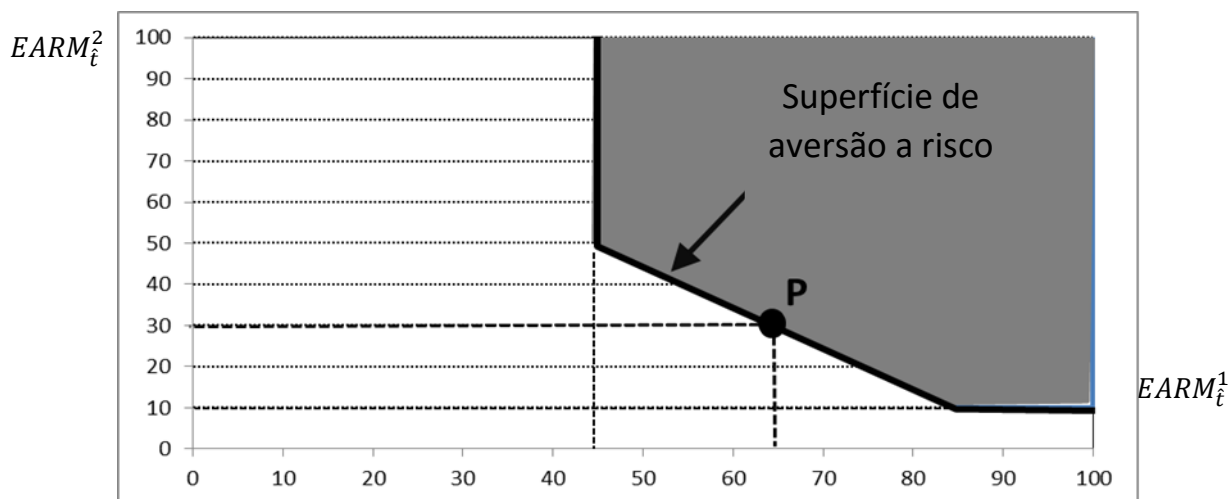


Figura 5.2 - Superfície de aversão a risco para com os dados da tabela 1

Se os dois subsistemas fossem completamente isolados (isto é, $\overline{INT_{t+t}^{jsbm,tsbm}} = 0$), o armazenamento mínimo nos REEs seriam 65 e 30 respectivamente, que correspondem aos valores das expressões respectivas $\sum_{t=1}^2 (D_{t+t}^{isbm} - EAF_{t+t}^{iree} - \overline{INT_{t+t}^{jsbm,tsbm}})$, indicado pelo ponto P na figura 5.2. Entretanto, os subsistemas podem se beneficiar do intercâmbio entre eles, que permitem uma diminuição nas condições de armazenamento inicial do REE de cada subsistema, contanto que o REE referente ao outro subsistema aumente seu armazenamento. Entretanto, existem armazenamentos mínimos necessários em cada REE, iguais a 45 e 10, respectivamente, devido a máxima capacidade de intercâmbio entre os subsistemas e/ou a máxima capacidade de armazenamento do outro REE.

Ressalta-se que, no caso mais geral considerado neste trabalho, o problema de operação abrange vários REEs / subsistemas, o que aumenta a complexidade para determinar todos os hiperplanos da SAR. Além disso, há uma relação não linear entre a capacidade máxima de geração e a energia armazenada de cada REE, devido à variação da produtividade com a queda. Neste caso, produz-se uma superfície de aversão a risco suave, que é impossível

de ser descrita de forma exata com um conjunto finito de cortes lineares. Esta foi a principal motivação para o desenvolvimento de um processo iterativo para construção da SAR, como descrito na seção 5.2. Entretanto, como será descrito mais a frente, propôs-se neste trabalho uma alternativa de construção *a priori* da SAR.

5.3.2. SAR condicionada

Nos problemas de planejamento hidrotérmico de longo prazo, há uma correlação entre as afluências entre períodos consecutivos, de acordo com um modelo auto regressivo periódico (PARp) como descrito em 9.[27]. Portanto, pode ser interessante construir cenários críticos para SAR com dependência do passado recente do cenário *forward* usado para a resolução da PDDE. O subproblema da SAR é similar ao apresentado no item anterior, mas com uma modificação na equação de balanço hídrico:

$$EARM_{\hat{t}+t}^{iree} + GH_{\hat{t}+t}^{iree} + EVERT_{\hat{t}+t}^{iree} = EARM_{\hat{t}+t-1}^{iree} + \eta_{\hat{t}+t}^{iree} + \sum_{\tau=1}^{P_{iree,t}} \varphi_{\tau,t}^{iree} EAF_{\hat{t}+t}^{iree} \quad (21)$$

onde $P_{iree,t}$ é a ordem do modelo para o REE *iree* e período t e $\varphi_{\tau,t}^{iree}$ é o coeficiente relativo a cada τ -ésima afluência passada. Como veremos depois na seção 5.4.2, essas equações recursivas trazem uma complexidade adicional quando consideramos as derivadas para as restrições da SAR

5.3.2.1. Variáveis adicionais no subproblema da SAR

No Newave há um tratamento especial para usinas que utilizam Gás Natural Liquefeito (GNL) que por condições de logística necessitam ser despachadas com k meses de antecedência 9.[33]. Porém essas restrições não são consideradas no subproblema da SAR, onde é considerado que todas as usinas térmicas, inclusive as movidas a GNL são despachadas no máximo.

5.4 Restrição da SAR

A restrição da SAR é um corte de viabilidade a ser introduzido no subproblema do Newave, que traduz uma condição para a combinação de armazenamentos dos reservatórios equivalentes de energia para o atendimento a um determinado nível meta ao final do período seco sem a ocorrência déficit, considerando uma série crítica de afluência. Esse corte da SAR é construído com base nos multiplicadores de Lagrange

associados às variáveis de estado do subproblema da SAR, que para o caso não condicionado são os armazenamentos dos reservatórios equivalentes de energia e, para o caso condicionado, além do armazenamento também são consideradas como variáveis de estado as afluições passadas. Sendo o valor da função objetivo diferente de zero ao resolver o subproblema da SAR, a aproximação para série de Taylor de ordem um em torno das variáveis de estado será:

$$\begin{aligned}\beta &= \beta^* + \frac{\partial\beta}{\partial EARM_t^\omega} (\widehat{EARM}_t^\omega)^T (EARM_t^\omega - \widehat{EARM}_t^\omega) \rightarrow \beta \\ &= \beta^* + \pi_{v_{SAR}}^t{}^T (EARM_t^\omega - \widehat{EARM}_t^\omega)\end{aligned}\quad (22)$$

onde os multiplicadores $\pi_{v_{SAR}}^t$ são não positivos, visto que um acréscimo no armazenamento inicial atuará no sentido de diminuição do valor da função objetivo da SAR.

A condição de viabilidade para o atendimento à demanda no subproblema SAR sem ativar as variáveis de folga DEF_{t+t}^{isbm} e atendimento ao nível meta da SAR sem ativar a variável de folga δ_{sar}^{iree} é $\beta \leq 0$, ou seja:

$$\begin{aligned}\beta^* + \frac{\partial\beta}{\partial EARM_t^\omega} (\widehat{EARM}_t^\omega)^T (EARM_t^\omega - \widehat{EARM}_t^\omega) \leq 0 &\rightarrow -\pi_{v_{SAR}}^t{}^T EARM_t^\omega \\ &\geq \beta^* - \pi_{v_{SAR}}^t{}^T \widehat{EARM}_t^\omega\end{aligned}\quad (23)$$

Portanto, esta restrição consiste em uma combinação linear dos armazenamentos em cada subsistema.

5.4.1. Coeficientes de armazenamento para restrição da SAR

Para o caso não condicionado, a restrição da SAR é uma combinação linear dos armazenamentos com objetivo de manter os níveis de armazenamento superiores a um dado volume meta mínimo. Na figura 5.3 abaixo são apresentadas duas alternativas gráficas para interpretação da restrição da SAR: a primeira – apresentada à esquerda - mostra o hiperplano que indica como a função objetivo do subproblema da SAR varia com o valor das variáveis de estado. O corte que é incluído no subproblema do Newave é a interseção de cada hiperplano com o eixo $\beta = 0$, apresentado na figura a direita.

Qualquer corte paralelo a um ou mais eixos corresponde à situação onde o armazenamento relativo a este eixo não contribui para atender este requisito, possivelmente por conta de limites de intercâmbio.

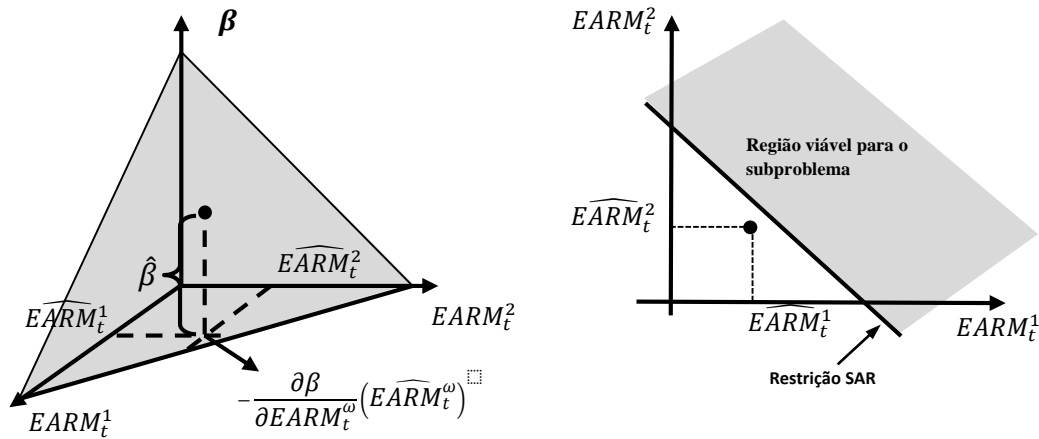


Figura 5.3 – Interpretação gráfica para as restrições da SAR: Uma análise de sensibilidade da solução ótima para o subproblema da SAR (esquerda) e o corte de viabilidade incluído no problema da PDDE (direita).

Os valores dos coeficientes $\pi_{v_{SAR}}^t$ para os armazenamentos $EARM_t^{iree}$ para cara reservatório *iree* na restrição da SAR são dados pelo negativo do valor dos multiplicadores de Lagrange das restrições de balanço hídrico para o período $\hat{t} + 1$. Como é utilizada uma linearização por partes para as parábolas de correção em função do armazenamento 9.[18] no subproblema da SAR, como meta de vazão mínima, geração hidráulica máxima e desvio d'água, estes termos adicionais também devem ser considerados no cálculo de $\frac{\partial \beta}{\partial EARM_t^\omega}$.

5.4.2. Coeficientes para as aflúncias passadas

A consideração e a interpretação física dos coeficientes $\pi_{A,p_{\hat{t}}}$ relativo às aflúncias passadas $\hat{t} + 1 - p$ são mais complexas. Devido à aplicação do modelo auto regressivo periódico no subproblema da SAR, a energia passada de $\hat{t} + 1 - k$, para $k = 1, \dots, P_{iree,\hat{t}}$ impacta diretamente o lado direito (“RHS”) de todas as equações de balanço hídrico de $\hat{t} + 1$ até $\max\{\hat{t} + 1, \hat{t} + 1 - k + P_{iree,\hat{t}}\}$, onde $P_{iree,\hat{t}} > 0$ é a ordem do modelo autoregressivo para o reservatório equivalente *iree* no período t . A tabela 2 a seguir

sintetiza todos os termos do RHS das equações de balanço hídrico que são dependentes diretamente das afluições passadas para o subproblema da SAR.

Tabela 2 – Afluições passadas que impactam diretamente o lado direito do subproblema da SAR

	Período do horizonte do subproblema da SAR			
	$\hat{t} + 1$	$\hat{t} + 2$...	$\hat{t} + T_{SAR}^{\hat{t}}$
\hat{t}	$\hat{\Phi}_{1,\hat{t}+1}^{iree} \widehat{EAF}_{\hat{t}}^{iree}$	$\hat{\Phi}_{2,\hat{t}+2}^{iree} \widehat{EAF}_{\hat{t}}^{iree}$...	$\hat{\Phi}_{T_{SAR}^{\hat{t}},\hat{t}+T_{SAR}^{\hat{t}}}^{iree} \widehat{EAF}_{\hat{t}}^{iree}$
$\hat{t} - 1$	$\hat{\Phi}_{2,\hat{t}+1}^{iree} \widehat{EAF}_{\hat{t}-1}^{iree}$	$\hat{\Phi}_{3,\hat{t}+3}^{iree} \widehat{EAF}_{\hat{t}-1}^{iree}$...	$\hat{\Phi}_{T_{SAR}^{\hat{t}},\hat{t}+T_{SAR}^{\hat{t}}}^{iree} \widehat{EAF}_{\hat{t}-1}^{iree}$
...
t_{min}	$\hat{\Phi}_{P_{iree,\hat{t}+1},\hat{t}+1}^{iree} \widehat{EAF}_{t_{min}(\hat{t}+1)}^{iree}$	$\hat{\Phi}_{P_{iree,\hat{t}+2},\hat{t}+2}^{iree} \widehat{EAF}_{t_{min}(\hat{t}+2)}^{iree}$...	$\hat{\Phi}_{P_{iree,\hat{t}+T_{SAR}^{\hat{t}}},\hat{t}+T_{SAR}^{\hat{t}}}^{iree} \widehat{EAF}_{t_{min}(\hat{t}+T_{SAR}^{\hat{t}})}^{iree}$

onde, para cada período ($\hat{t} + t$) no horizonte do subproblema da SAR, o termo $t_{min} = (\hat{t} + 1) - \max\{0; P_{i,t} - (t - (\hat{t} + 1))\}$ indica o período mais antigo que contribui para as afluições deste período (se $t_{min} = \hat{t} + 1$, não há contribuição de afluições passadas). Nota-se que uma vez que a ordem do modelo par-P pode variar ao longo dos períodos, não necessariamente o número de termos relativos as afluições passadas diminuem com o índice $\hat{t} + t$.

Os termos apresentados na tabela 2 indicam somente a contribuição direta de $\widehat{EAF}_{\hat{t}-\tau}$ nas afluições do subproblema da SAR. Entretanto, podemos notar que $\widehat{EAF}_{\hat{t}+j}$ também depende de $\widehat{EAF}_{\hat{t}+i}$, para ($0 < i < j$) e $\widehat{EAF}_{\hat{t}+i}$ pode também depender de $\widehat{EAF}_{\hat{t}-\tau}$, ou diretamente (como na tabela 2) ou indiretamente (do mesmo modo que $\widehat{EAF}_{\hat{t}-j}$ acima). Todas as relações recursivas devem ser levadas em conta quando é calculado as derivadas, seguindo a expressão abaixo:

$$\frac{\partial \beta}{\partial EAF_{\hat{t}-p}}(\widehat{EAF}_{\hat{t}-p}^{\omega}) = \sum_{t=1}^{T_{SAR}^{\hat{t}}} \Phi_t^p \quad (24)$$

Os termos Φ_t^p são as contribuições da afluência passada $\widehat{EAF}_{\hat{t}-p}$ para a afluência $EAF_{\hat{t}+t}$, dada pela seguinte formula recursiva:

$$\Phi_t^p = \sum_{i=1}^{t-1} (\varphi_{\hat{t}+t}^i \Phi_{t-i}^p) + \varphi_{\hat{t}+t}^{t+p-1} \quad (25)$$

onde os últimos termos são as contribuições diretas e o somatório no primeiro termo considera todas as relações indiretas.

5.4.3. Subproblema do Newave com as restrições da SAR

A restrição da SAR que é incluída no subproblema do Newave, para o caso não condicionado (que foi o efetivamente considerado na proposta desse trabalho), apresenta a seguinte expressão:

$$-\pi_{V_{SAR}}^t \mathbf{x}_{V_t}^{\omega} + \Delta_{SAR} \geq RHS_{SAR} \quad (26)$$

onde RHS_{SAR} é o termo independente da aproximação de Taylor. O primeiro termo da restrição acima é uma combinação linear de um ou mais armazenamentos no sistema e o segundo termo é uma folga, penalizada na função objetivo do NEWAVE, para tratar os casos em que a restrição SAR torna o subproblema do NEWAVE inviável.

O Subproblema do Newave será então:

Min. (1)

s.a.

(2)-(10)

$$\sum_{iree=1}^{nree} \pi_{V_{t+1}}^{iree,irsar} EARM_{t+1}^{iree} \geq RHS_{t+1}^{irsar} \quad (27)$$

5.5 Folga para restrição da SAR

A restrição da SAR impõe condições limites de armazenamento final para o subproblema do Newave, para que possa ser atingido um nível meta de armazenamento no subproblema da SAR, sem a ocorrência de déficit. Porém nem sempre é possível atender a estes requisitos pelas seguintes razões:

- A série de afluências passadas para o cenário forward no algoritmo da PDDE é tão crítica que não é possível atingir valores iniciais de armazenamentos necessários para o subproblema da SAR;
- Mesmo que a condição do item anterior não ocorra, decisões em períodos anteriores, $\hat{t} - 1, \hat{t} - 2, \dots$ podem ter sido tomadas sem o conhecimento da restrição da SAR a ser imposta na período \hat{t} . Neste caso, os cortes de Benders da PDDE serão construídos de modo que as decisões tomadas nesses períodos anteriores sejam ajustadas nas iterações futuras da PDDE.

Para garantir um recurso completo¹ na estratégia de solução da PDDE, é necessário incluir uma variável de folga Δ_{SAR}^t para o subproblema para cada período t , considerando possíveis violações das restrições da SAR. Durante o processo de convergência da PDDE são inseridas várias restrições da SAR. Portanto, para cada uma dessas restrições deve ser inserida variável de folga. Uma questão que surgiu durante o desenvolvimento desse trabalho foi: qual a melhor estratégia, utilizar uma variável de folga única para todas as restrições ou utilizar uma variável de folga diferente para cada restrição? A seguir essa questão é discutida.

5.5.1. Variável de folga única

Ao se considerar uma única variável de folga, a interpretação subjacente é de que o conjunto de restrições é representado como uma restrição única linear por partes. Porém, a consideração de variáveis de folga desta forma faz com que, ao se violar uma restrição haja um estímulo a violação de outras, como no exemplo da figura 5.4

¹ Em otimização estocástica, um problema multi-estágio com recurso completo é aquele que sempre resulta em um problema matematicamente viável para o subproblema de cada estágio, independente do valor das variáveis de estado a esse subproblema.

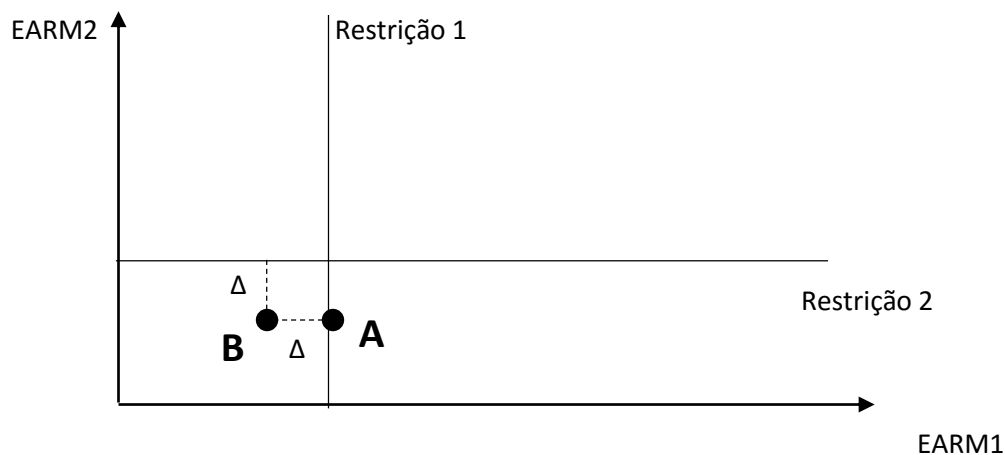


Figura 5.4 – Avaliação do valor de violação utilizando uma única variável de folga.

Neste exemplo, se o ponto A for o vetor de armazenamento final obtido, apenas a restrição 2 estará sendo violada e o valor desta violação será igual a Δ . Porém, ao utilizar uma folga única, o custo pela violação da SAR será o mesmo se o conjunto de armazenamento final for o ponto B. Entretanto, como no ponto de operação referente ao ponto B o armazenamento do REE 1 é menor, o custo total para este ponto será provavelmente menor, pois será necessário despachar menos térmicas neste valor de armazenamento. Desta forma, ao se violar uma restrição em um montante Δ há um estímulo a violar outras restrições desse mesmo montante, o que pode levar a simulações *forward* na PDDE com deplecionamento elevado nos níveis dos reservatórios.

5.5.2. Variáveis de folga diferentes para cada restrição

Ao se considerar uma folga para cada restrição, o problema descrito no exemplo anterior não ocorre, pois se o ponto de armazenamento final for o ponto A, o custo pela violação da SAR será Δ , enquanto se o ponto de armazenamento final for o ponto B, o custo pela violação da SAR será 2Δ . Entretanto, utilizar uma variável de folga para cada restrição aumenta consideravelmente o número de variáveis no PL a ser resolvido pelo subproblema do Newave, que pode elevar o esforço computacional. Além disso, se for necessário violar uma ou mais restrições por falta de recurso, quanto maior o número de restrições violadas maior será o custo pela violação da SAR, “poluindo” de forma exagerada o custo marginal de operação, que foi uma das desvantagens apresentadas pela SAR no estudo realizado em 2013 9.[10].

5.5.3. Abordagem híbrida: variáveis de folga diferentes por tipo de restrição

Uma alternativa para consideração da variável de folga é incluir uma variável de folga diferente para cada tipo de restrição, isto é: para todas as restrições que envolvam apenas o REE 1, será incluída uma mesma variável de folga; para todas as restrições que envolvam apenas o REE 2, insere-se outra variável de folga; restrições que envolvam apenas os REEs 1 e 2 terão outra variável de folga e assim por diante.

Durante o desenvolvimento desse trabalho, foram executados testes com esta formulação híbrida, porém o custo de violação da SAR continuou muito elevado, assim como no caso de uma variável para cada restrição, e foi portanto abandonada. Portanto, a forma utilizada para considerar a variável de folga no subproblema da PDDE neste trabalho foi considerar uma mesma variável de folga para todas as restrições da SAR, o que equivale a considerar a SAR como uma restrição única linear por partes

5.6 Discussão sobre as penalidades utilizadas para as variáveis no subproblema da SAR

Para a resolução do subproblema da SAR, algumas variáveis de folga são penalizadas na função objetivo, como o déficit e a violação pelo não atendimento ao nível meta de armazenamento ao final do período seco. Como no subproblema do Newave as diferentes variáveis penalizadas na função objetivo recebem diferentes valores de custo, o mesmo raciocínio foi utilizado inicialmente no subproblema da SAR. Porém, como a finalidade do subproblema da SAR é simplesmente fazer com que o valor da função objetivo seja igual a zero, foi realizado um estudo para avaliar se os custos associados as variáveis penalizadas na função objetivo devem ser iguais ou diferentes e quais valores devem ser adotados para essas penalizações.

5.6.1. Avaliação da recursão Newave-SAR considerando penalidades diferentes

Como explicado anteriormente, dado um período, série de afluência e abertura, é resolvido um subproblema do Newave e obtidos os valores de armazenamento final para cada REE. Estes valores são utilizados como dado de entrada para o subproblema da SAR. Suponha um exemplo ilustrativo onde exista apenas um REE, cujo valor de armazenamento final obtido pelo subproblema do Newave seja igual a 30 MWmês e que

a penalidade utilizada para o déficit seja igual a 5 \$/MWhês e a penalidade utilizada para a violação do nível meta igual a 8 \$/MWhês. Considere ainda que a série de afluência utilizada no subproblema da SAR seja não condicionada. Após a solução do subproblema da SAR, a violação do nível meta é igual a 2 MWhês e o valor do déficit igual 4 MWhês, assim:

$$\beta^* = \text{Custo}_{\text{deficit}} \times \text{Deficit} + \text{Custo}_{\text{SAR}} \times \delta_{\text{SAR}}$$

$$\beta^* = 5 \times 4 + 8 \times 2$$

$$\beta^* = 36$$

O valor da variável dual referente a equação de balanço hídrico ($\pi_{v \text{ SAR}}^t$) neste exemplo é igual a -8, pois se for acrescentado uma unidade de recurso, esta será armazenada reduzindo β^* de um valor igual a $\text{Custo}_{\text{SAR}}$. A restrição que será incluída no subproblema do Newave será:

$$\beta^* + \pi_{v \text{ SAR}}^t (EARM_t^\omega - \widehat{EARM}_{v t}^\omega) \leq 0$$

$$36 - 8(EARM_t^\omega - 30) \leq 0$$

$$8EARM_t^\omega \geq 276$$

Por simplicidade será considerado que sempre será possível atender a restrição da SAR, assim foi omitido a variável de folga para facilitar o entendimento.

Adicionando esta nova restrição e resolvendo novamente o subproblema do Newave, é obtido um armazenamento igual 34,5 MWhês, atendendo assim a restrição da SAR. Ao resolver novamente o subproblema da SAR, o requisito de nível meta será atendido e o valor de déficit será igual a 1,5 MWhês, assim:

$$\beta^* = \text{Custo}_{\text{deficit}} \times \text{Deficit}$$

$$\beta^* = 5 \times 1,5$$

$$\beta^* = 7,5$$

O valor de $\pi_{v_{SAR}}^t$ será igual ao custo do déficit, pois se mais uma unidade de energia for adicionada, esta será convertida em geração, considerando que não foi atingida a capacidade máxima de geração hidráulica, e o déficit será reduzido de uma unidade. A restrição construída então será:

$$\beta^* + \pi_{v_{SAR}}^t (EARM_t^\omega - \widehat{EARM}_t^\omega) \leq 0$$

$$7,5 - 5(EARM_t^\omega - 34,5) \leq 0$$

$$5EARM_t^\omega \geq 180$$

Ao resolver novamente o subproblema do Newave o valor final de armazenamento será igual a 36 e resolvendo o subproblema da SAR β^* será igual a zero, terminando assim a recursão Newave-SAR e passando para a solução da próxima abertura.

5.6.2. Avaliação da recursão Newave-SAR considerando penalidade única

Supondo agora que seja considerado o mesmo valor de penalidade igual a 5 \$/MWh tanto para o Déficit quanto para violação do subproblema da SAR. Resolvendo o problema do Newave, o valor obtido para o armazenamento é igual a 30 MWh, assim o déficit será igual a 4 MWh e a violação do nível meta igual a 2 MWh, então:

$$\beta^* = \text{Custo}_{\text{deficit}} \times \text{Deficit} + \text{Custo}_{\text{SAR}} \times \delta_{\text{SAR}}$$

$$\beta^* = 5 \times 4 + 5 \times 2$$

$$\beta^* = 30$$

O valor de $\pi_{v_{SAR}}^t$ será igual a -5, pois se for acrescentado uma unidade de recurso, esta pode ser tanto armazenada quanto gerada que a redução no custo do subproblema da SAR será a mesma. A restrição que será construída para o subproblema do Newave será:

$$\beta^* + \pi_{v_{SAR}}^t (EARM_t^\omega - \widehat{EARM}_t^\omega) \leq 0$$

$$30 - 5(EARM_t^\omega - 30) \leq 0$$

$$5EARM_t^\omega \geq 180,$$

que levará, em uma única iteração, ao mesmo valor de meta de armazenamento final no subproblema do Newave. Portanto, enquanto ao considerar valores diferentes de penalidade no subproblema da SAR foram necessárias três iterações para obter $\beta^* = 0$, com valores iguais de penalidade foram necessárias somente duas iterações para obter a condição $\beta^* = 0$.

Aprofundando mais a discussão, com o exemplo anterior é possível observar que quando são considerados valores diferentes para as penalidade no subproblema da SAR, podem ser construídas mais restrições que o necessário. Isto ocorre pois para algumas regiões de armazenamento, mais de uma restrição do subproblema da SAR pode estar sendo violada, gerando assim primeiro cortes com coeficientes elevados, que levam a valores de meta armazenamento mínimo menores. Quando são atingidas regiões de armazenamento onde apenas uma restrição está sendo violada, os cortes tem coeficientes menores e indicam corretamente o valor de meta armazenamento mínimo necessário no subproblema do Newave que levará a função objetivo da SAR ser igual a zero.

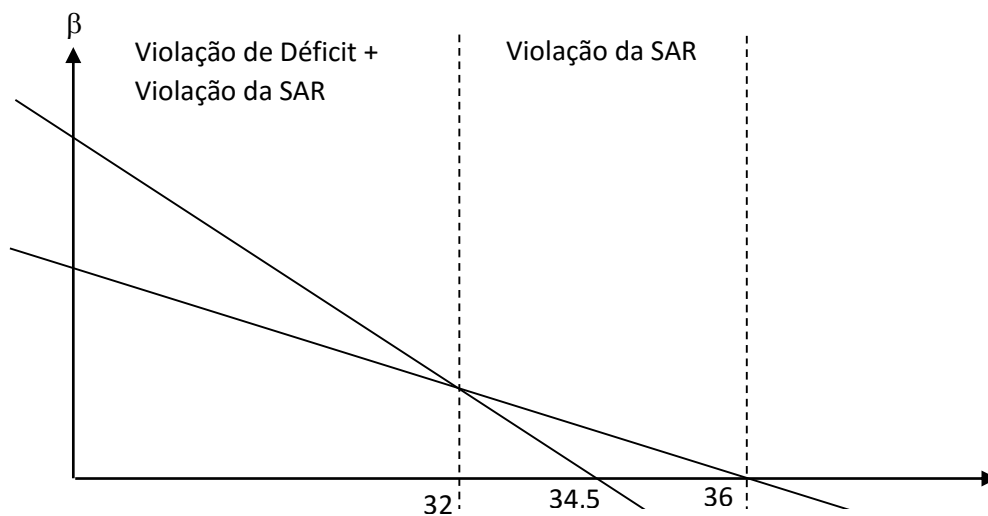


Figura 5.5 – Regiões de violação da SAR.

Observa-se na figura 5.5 que armazenamentos no subproblema do Newave até o valor de 32, duas restrições estão sendo violadas e com isso o cortes construído levará a um nível meta de armazenamento igual a 34,5 que é menor que o mínimo necessário para $\beta = 0$. Para armazenamentos maiores que 32 apenas a restrição da SAR está sendo violada e o

corte construído para esta região levará a um nível meta de armazenamento igual a 36, que se for atingido no subproblema do Newave levará a $\beta = 0$.

5.6.3. Avaliação do valor a ser utilizado para penalidade da SAR

Posto que a análise realizada no item 5.7.1 indica que o número de iterações da recursão Newave-SAR é reduzido se for utilizado um valor único de penalidade para o subproblema da SAR, é necessário agora fazer uma avaliação de qual valor de penalidade utilizar. Supondo o exemplo anterior, onde o armazenamento final obtido no subproblema do Newave seja igual a 30 MWmês e que a penalidade utilizada no subproblema da SAR seja igual a 5 \$/MWmês. A restrição a ser inserida no subproblema do Newave é igual a:

$$-\pi_{v_{SAR}}^t \text{}^T EARM_t^\omega + \Delta_{SAR} \geq RHS_{SAR}$$

$$5 \text{}^T EARM_t^\omega + \Delta_{SA} \geq 180$$

Supondo agora que a penalidade utilizada seja igual a 8 \$/MWmês. A restrição construída seria:

$$8 \text{}^T EARM_t^\omega + \Delta_{SAR} \geq 288$$

Se o armazenamento final obtido pelo subproblema o Newave for igual a 35, a restrição gerada com o custo igual a 5 \$/MWmês apresentará um valor para Δ_{SAR} igual a 5 MWmês e o valor de Δ_{SAR} para restrição construída com o custo igual a 8 \$/MWmês será igual a 8 MWmês. Portanto, apesar das duas restrições sinalizarem a mesma meta de armazenamento (36 MWmês), apresentam valores diferentes para violação deste requisito, de acordo com o valor utilizado para a violação da restrição no subproblema da SAR.

Para que a restrição não seja função do custo utilizado no subproblema da SAR, a restrição deve ser normalizada pelo custo da SAR, ou deve ser utilizado custo unitário no problema da SAR. Para evitar que seja feita essa normalização durante o processo de convergência do modelo, foi utilizado neste trabalho um custo unitário de valor igual a “1” no subproblema da SAR.

6. Propostas de Aprimoramento da SAR

Durante os estudos realizados pela CPAMP para internalização da SAR como medida de aversão a risco no modelo Newave foram observadas duas questões:

- o acúmulo de penalidades por violação da SAR, que dificulta a escolha do valor do custo para a penalidade associada a violação deste requisito;
- tempo computacional elevado.

Este trabalho então propõe dois aprimoramentos para melhoria de cada uma dessas questões.

6.1 Processo alternativo de penalização de violações da SAR

6.1.1. Motivação

Durante o processo iterativo da PDDE, são incluídas restrições de viabilidade da SAR com o objetivo de manter os níveis de armazenamento dos reservatórios equivalente de energia elevados. Essas restrições traduzem condições para as combinações de armazenamento dos REE para que não haja déficit e seja possível atender um determinado nível de armazenamento ao final do período seco. Porém, nem sempre é possível atender às restrições da SAR considerando os níveis iniciais de armazenamento e a energia natural afluente. Sendo assim, é necessária uma variável de folga para que tais restrições possam ser violadas, sendo penalizada na função objetivo, como discutido na seção 5.5.

Portanto, para todos os períodos com restrição da SAR, é inserida um variável de folga no conjunto de restrições da SAR, que é penalizada na função objetivo. Um problema que pode ocorrer com a penalização desta forma é que, para uma mesma série de afluência, a violação das restrições da SAR pode ocorrer em vários períodos, resultando em um efeito cumulativo de penalidade indesejado, como exemplificado abaixo para um caso hipotético de apenas um REE.

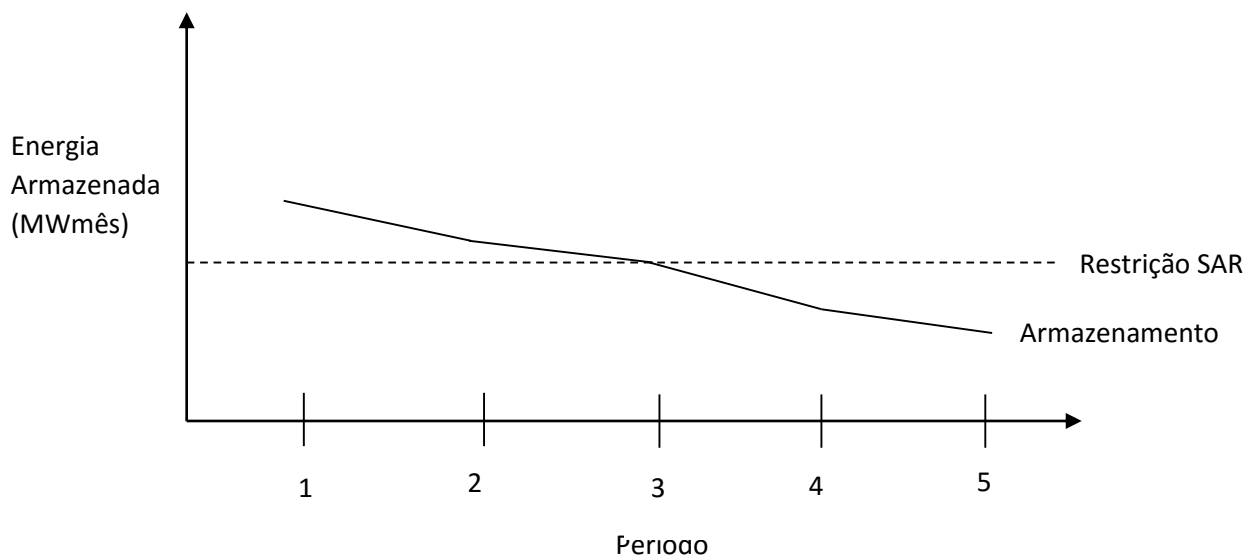


Figura 6.1 – Evolução da Energia armazenada para um caso exemplo.

Neste exemplo ocorre violação da restrição da SAR nos períodos 4 e 5 e o custo pelo não atendimento a esta restrição será:

$$CustoSAR = \delta sar_4 \times PenalidadeSAR + \delta sar_5 \times PenalidadeSAR$$

Supondo agora que seja acrescentada uma unidade de energia natural afluyente no período 4 e que o custo de penalidade seja o maior custo envolvido no problema. Assim esta energia adicional será armazenada no período 4, o que resultará em um aumento no armazenamento inicial para o período 5. Como a penalidade da SAR é a maior entre as todas as penalidades também neste período, haverá também um aumento no valor do armazenamento final para o período 5. Desta forma o valor para violação da SAR será reduzido de uma unidade tanto para o período 4 quanto para o período 5 e o custo pela violação da SAR será:

$$CustoSAR = (\delta sar_4 - 1) \times PenalidadeSAR + (\delta sar_5 - 1) \times PenalidadeSAR$$

$$CustoSAR = \delta sar_4 \times PenalidadeSAR + \delta sar_5 \times PenalidadeSAR - 2 \times PenalidadeSAR$$

Neste exemplo com apenas uma unidade adicional de energia, o custo diminui em duas vezes a penalidade da SAR, ou seja, ao penalizar a violação pelo não atendimento da SAR em todos os períodos, ocorre um acúmulo de penalidade. Este acúmulo é indesejado, já

que o custo pelo não atendimento das restrições da SAR não está diretamente associado ao montante de energia adicional necessário para o atendimento a esta restrição. Ressalta-se que esse acúmulo de penalidade é refletido no valor da água.

A proposta do trabalho é modificar a forma como as restrições da SAR são penalizadas, com o objetivo de evitar este acúmulo de penalização e que a escolha do valor para a penalização da SAR seja mais intuitiva.

6.1.2. Metodologia

Neste trabalho é proposta uma alternativa para penalização da SAR com o objetivo de evitar o efeito cumulativo de penalidade pelo não atendimento as restrições da SAR. Nessa metodologia, diferentemente da forma de penalização atual, onde a violação é penalizada a todo período, o não atendimento das restrições da SAR é penalizado **apenas no período anterior ao período do nível meta e apenas a maior violação entre todos os períodos é penalizada.**

6.1.2.1. Inclusão de novas restrições

A discretização dos subproblemas do Newave é por período e o valor a ser penalizado é a maior violação entre todos os períodos onde tem restrição da SAR. Portanto, é necessário incluir restrições ao problema do Newave com o objetivo de obter a máxima violação da SAR entre todos os períodos. Portanto serão incluídas as seguintes restrições relativas a SAR no subproblema do Newave:

$$-\pi_{v\ SAR}^t \ EARM_t^\omega + \delta_{SAR}^t \geq RHS_{SAR} \quad (28)$$

$$MX_t \geq \delta_{SAR}^t \quad (29)$$

$$MX_t \geq MX_{t-1} \quad (30)$$

A restrição (28) se refere à restrição propriamente dita da SAR, ou seja, a combinação de armazenamentos dos reservatórios do sistema deve ser maior que um determinado requisito. As restrições (29) e (30) são incluídas para obter a maior violação entre todos os períodos.

Desta forma a variável MX_t contém o maior valor de violação entre todos os períodos da SAR, até o período t , e esse valor será penalizado apenas na função objetivo do período $T_{SAR} - 1$. O custo da SAR passa então a ser:

$$CustoSAR = MX_{T_{SAR}-1} \times PenalidadeSAR$$

Utilizando o exemplo do item anterior, como $\delta_{SAR}^5 > \delta_{SAR}^4$, então o custo pela violação da SAR será:

$$CustoSAR = \delta_{SAR}^5 \times PenalidadeSAR$$

6.1.2.2. Inclusão de nova variável de estado

Nesta metodologia a violação pelo não atendimento as restrições da SAR é penalizada apenas no período $T_{SAR}-1$. Portanto é necessário incluir uma sinalização nos períodos diferentes de $T_{SAR}-1$, nos quais são incluídas restrições, para indicar que uma violação neste período acarretará em um custo no futuro (que será contabilizado no período $T_{SAR}-1$). Esta sinalização é feita através de uma variável de estado adicional $x_{MX_t}^\omega$ nos cortes de Benders. Desta forma o corte de Benders passa a ser:

$$\alpha \geq RHS + \pi_v^t EARM_t^\omega + \pi_a^t EAF_t^\omega - \pi_{MX}^t MX_t^\omega \quad (31)$$

Onde:

$$\pi_{MX}^t \rightarrow \text{Variável dual associada à restrição } MX_t \geq MX_{t-1}$$

Supondo que seja adicionada uma unidade de energia ao período 4, e supondo que a penalidade da SAR seja a maior penalidade envolvida no problema, essa energia será armazenada no período 4 devido a sinalização dada pelo custo futuro, e também será armazenada no período 5. Então o custo pela violação da SAR será:

$$CustoSAR = (\delta_{SAR}^5 - 1) \times PenalidadeSAR$$

Com esta nova proposta de metodologia, uma unidade adicional de energia reduz o custo em apenas uma unidade, evitando o efeito cumulativo de penalização e indicando, de

forma mais intuitiva, qual o requisito de energia necessário para que não haja violação das restrições da SAR ao longo de todos os períodos.

6.1.2.3. Discussão sobre inclusão da restrição adicional nos passos Backward e Forward da PDDE

Ao incluir as restrições (29) e (30) a otimização da operação faz com que, ao ocorrer uma violação de um montante Δ no período $t-1$, haja um estímulo para violar a restrição também no período t , no mesmo montante Δ violado no período anterior. Isto ocorre porque qualquer violação da restrição no período t no intervalo $[0, \Delta]$ levará ao mesmo valor de custo, contabilizado no período $T_{SAR}-1$

Como consequência, em séries *forward* onde em alguns períodos de tempo se atinjam valores de armazenamentos muito baixos, mas que teriam capacidade de se recuperar em períodos seguintes, provavelmente não retornarão a níveis mais elevados, pela falta de estímulo em termos de redução na penalização da SAR. Ressalta-se que esse problema não ocorre na proposta tradicional de penalização da SAR em todos os períodos.

Portanto, no passo *forward*, ao inserir essas restrições, podem ser atingidos estados indesejados, ou seja, estados com armazenamento muito baixos devido a indução causada pela restrição(30). Assim, durante o passo backward todas as três restrições são consideradas, porém **no passo forward a restrição (29) não é considerada**. Em estudos preliminares a restrição (29) foi considerada, mas não considerar esta restrição apresenta melhores resultados.

Assim como no passo forward da PDDE, na simulação final também não é considerada a restrição (30) para que durante a simulação da operação para diferentes cenários, os armazenamento tenham maior capacidade se recuperar.

6.2 SAR a priori

Na metodologia para a construção da SAR durante a PDDE implementada originalmente no modelo NEWAVE e descrita na seção 5.2, ao final de cada período, série e abertura é solucionado um problema adicional, o que demanda um elevado tempo computacional. Uma alternativa a essa metodologia é construir a superfície de aversão a risco a priori, ou seja, construir as restrições antes de iniciar o processo de convergência da PDDE. Para

isso, em cada período é necessário discretizar as variáveis de estado e resolver um subproblema correspondente da SAR. Lembra-se que, no caso não condicionado, as variáveis de estados são os armazenamentos dos reservatórios, enquanto para o caso condicionado, além dos armazenamentos, as afluências passadas também são variáveis de estado.

Este trabalho propõe então uma alternativa metodológica para construção da SAR para o caso não condicionado, onde a construção da SAR ocorre antes do processo de convergência da PDDE, com o objetivo de diminuir o tempo para construção da SAR.

6.2.1. Discretização dos níveis de armazenamento

Na metodologia atual, os vetores de armazenamentos obtidos após a solução de um subproblema do Newave são utilizados como entrada para o subproblema da SAR. Na metodologia proposta o vetor de armazenamentos também é um dado de entrada para o subproblema da SAR, porém este ao invés de ser obtido a partir de uma simulação, é obtido pela combinação dos níveis dos reservatórios que são discretizados. Para tanto, o volume total do reservatório é dividido em determinado número de pontos, e a combinação de cada discretização do volume armazenado para cada reservatório equivalente de energia é considerado como o vetor de entrada para o subproblema da SAR, conforme figura 6.2 onde é exemplificado o caso para dois reservatórios equivalentes de energia. Inicialmente foi considerado apenas parte do domínio de valores de volume para discretização, porém observou-se que era necessário discretizar o volume em seu domínio completo. Observou-se também que não era necessário uma grande número de níveis de discretização (densidade da grade) para conseguir uma boa representação da SAR.

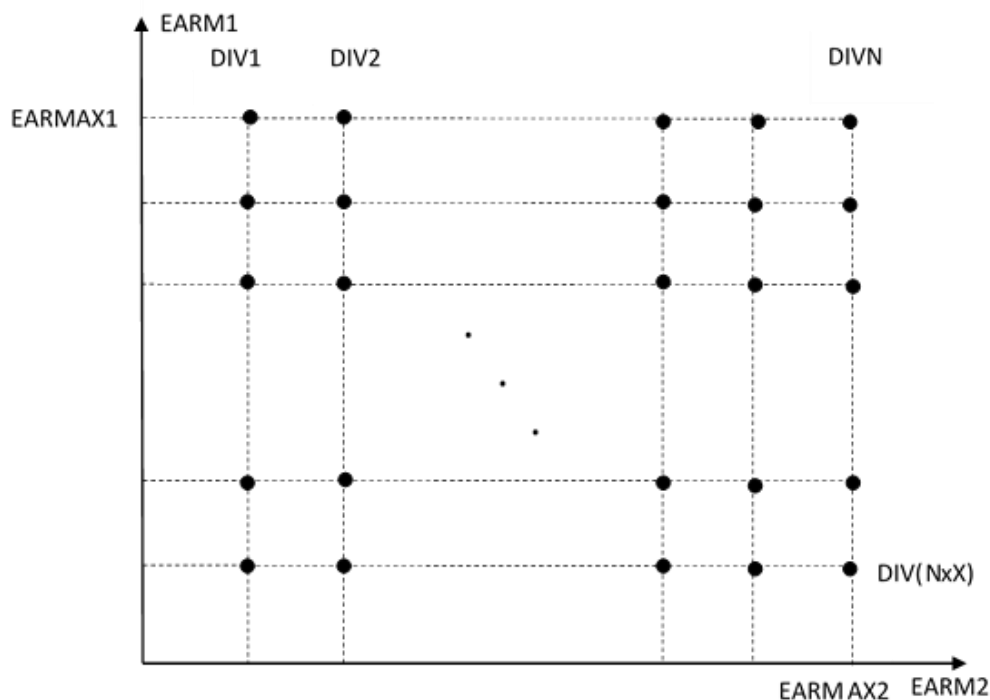


Figura 6.2 - Exemplo de discretização de armazenamento.

6.2.2. Vantagem na construção da SAR a priori

O procedimento para construção da SAR durante o processo iterativo da PDDE é mais custoso computacionalmente pois a recursão Newave-SAR é realizada até a convergência do processo, ou seja, até que não haja déficit ou violação do nível meta no subproblema da SAR ($\beta=0$), ou seja atingido um número máximo de iterações igual a cinco. Durante esta recursão, o problema de programação linear (PL) do Newave para um determinado período, série e abertura é construído e resolvido. Após a solução desse subproblema, são obtidos os valores de armazenamento que serão utilizados como entrada para o subproblema da SAR. Com esses valores de armazenamento, e como o problema da SAR é diferente do problema do Newave, pois o problema da SAR é multi-estágio, e consideram diferentes restrições, é necessário construir o PL da SAR, este é resolvido e verifica-se se foi possível atender o nível meta da SAR sem ocorrência de déficit. Caso não seja possível, é construída uma restrição adicional para o problema do Newave que é construído e resolvido novamente considerando esta nova restrição, e esse processo continua até que não haja déficit. Pode ser necessário construir mais de uma restrição para o subproblema do Newave pois existem não linearidades devido as parábolas de correção em função do armazenamento, que no subproblema da SAR são consideradas como um

aproximação linear por partes. Esse procedimento de construir o PL, solucionar e obter os resultados para cada subproblema da SAR e do Newave a cada recursão se mostrou muito custoso computacionalmente.

Para construção da SAR a priori, os níveis dos reservatórios equivalentes são discretizados. Em seguida, para o primeiro nível de discretização, constrói-se um subproblema da SAR, que é resolvido e observa-se se foi possível atender o nível meta da SAR sem a ocorrência de déficit. Caso isso não seja possível, é construída uma restrição da SAR. Em seguida, são obtidos novos valores para discretização dos armazenamentos, porém não há necessidade de construir o problema completo novamente, pois este não muda com o valor do armazenamento inicial: basta modificar o RHS referente ao vetor de armazenamentos iniciais. Desta forma é necessário montar o PL apenas uma vez por período, bastando para os níveis de discretização de armazenamentos seguintes modificar o RHS do problema para cada nível de discretização.

6.3 Paralelização do procedimento de construção da SAR a priori

Como as séries de aflúncias utilizadas para o processo de convergência da PDDE no programa Newave são independentes, na solução são utilizadas técnicas de processamento paralelo. Para tanto é utilizado MPI (Message Passing Interface)⁹.^[34], onde um determinado número de séries é resolvido por cada processador da máquina, sendo assim possível reduzir consideravelmente o tempo de processamento conforme figura supondo dois cenários e duas aberturas w 6.3.

Em MPI, A troca de informações entre os processadores envolvidos se dá por mensagens, onde são incluídas instruções de envio e recebimento no código fonte do programa. Assim é possível comunicar os problemas entre os processadores e cada problema é resolvido simultaneamente. Para a programação em MPI é necessária uma biblioteca que contém um conjunto de rotinas e para execução é necessário que seja instalado um gerenciador de processos. Esse gerenciador de processos é responsável por coordenar os envios de mensagens entre os processadores.

Este conceito também foi utilizado para a construção da SAR a priori, porém neste problema os períodos são independentes entre si. Assim, os períodos para os quais são

construídas restrições da SAR são divididos entre os processadores, e assim resolvido o subproblema da SAR e construídas restrições para estes períodos, conforme diagrama da figura 6.4.

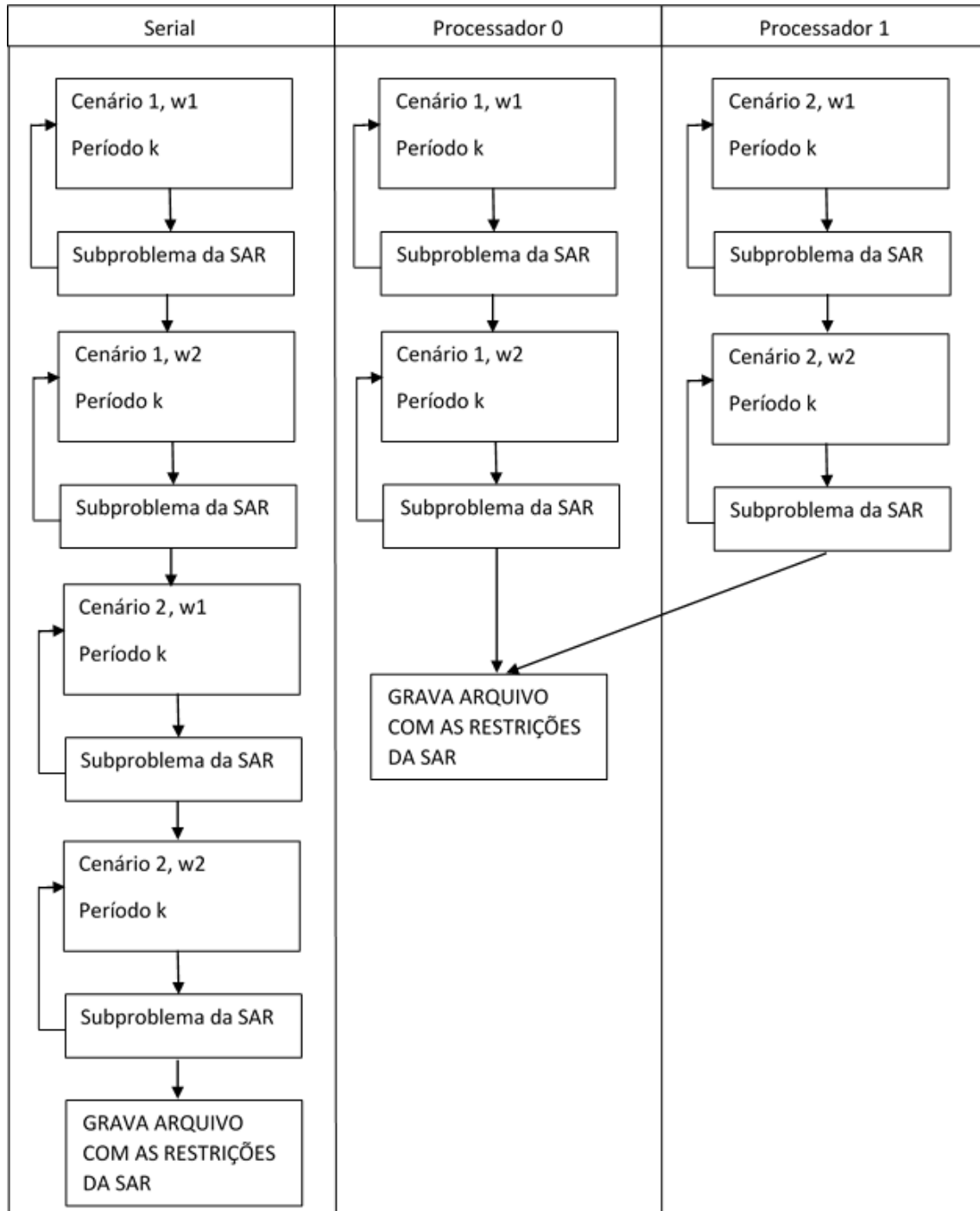


Figura 6.3 - Esquema de paralelização utilizada na recursão backward.

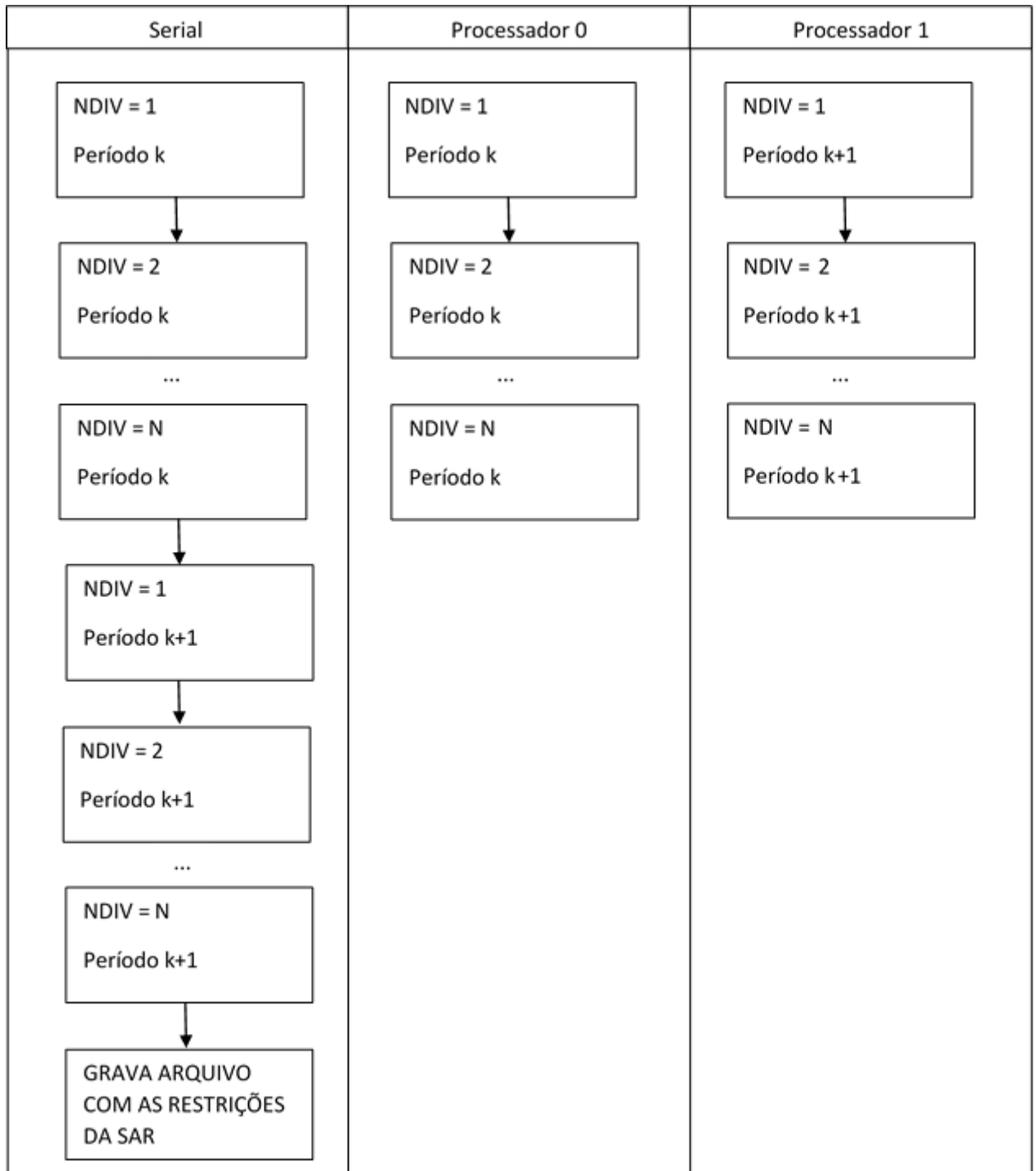


Figura 6.4 - Esquema de paralelização da SAR a priori.

Como a construção das restrições da SAR é feita antes do processo de convergência da PDDE, o esquema de paralelização apresentado na figura 6.3 é modificado, pois não é necessário a solução do problema adicional da SAR. Assim o esquema de paralelização do Newave passa a ser o apresentado na figura 6.5.

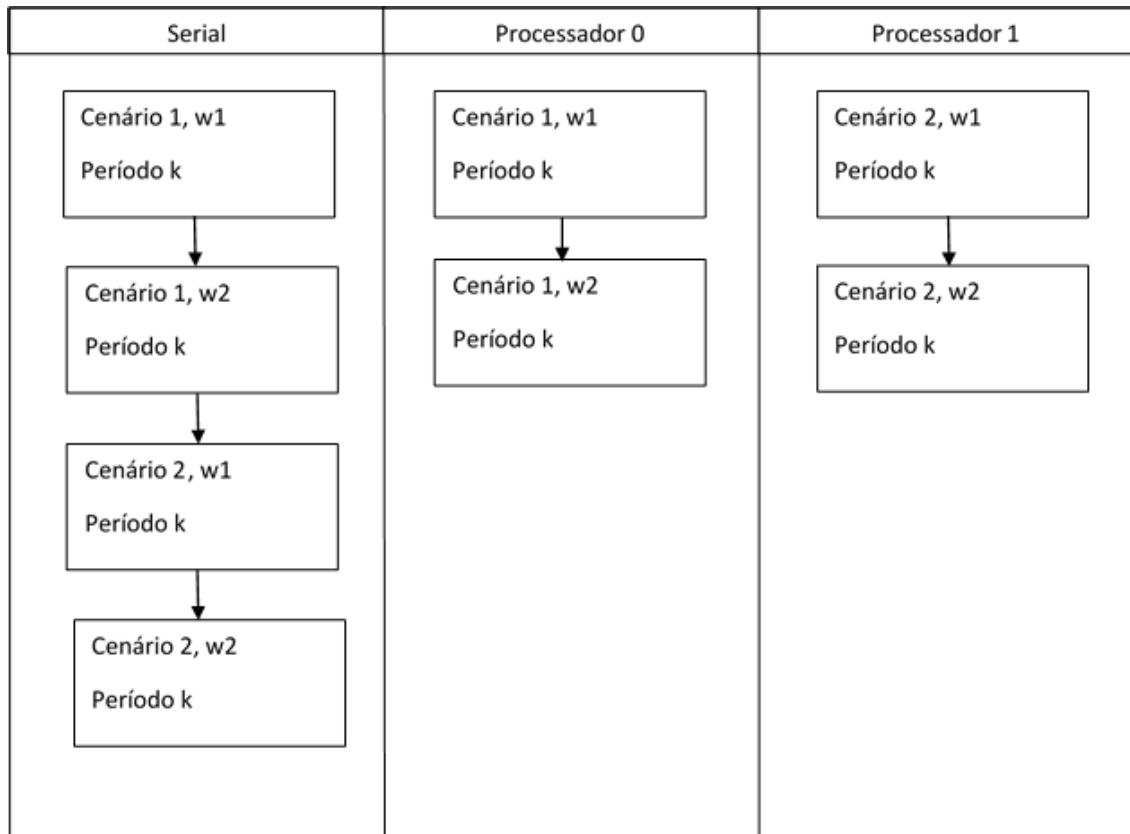


Figura 6.5 - Esquema de paralização da backward considerando a construção da SAR a priori

Outro análise realizada no trabalho é avaliar o ganho de tempo ao considerar a construção da SAR a priori, utilizando técnica de processamento paralelo versus a construção da SAR durante o processo de convergência da PDDE.

7. Resultados Numéricos

Para avaliar a metodologia proposta e sua implementação no modelo Newave, foi simulado o caso do Programa Mensal da Operação (PMO) realizado pelo ONS para dezembro de 2014 para as metodologias neutra a risco, CVaR, SAR considerando a formulação de penalização anterior 9.[19] e SAR considerando a nova formulação de penalização proposta neste trabalho. Este caso é composto por 162 usinas hidráulicas e 140 usinas térmicas. São considerados 3 patamares de carga e 4 patamares para a curva de custo de déficit.

Para o cálculo da política ótima de operação são utilizadas 200 séries sintéticas de aflúências e 20 aberturas e 2000 séries sintéticas para a simulação final, como a diferença entre os casos é somente a metodologia de aversão ao risco, as séries de aflúência geradas são iguais em todos os casos. Todos estes cenários de aflúência são gerados pelo modelo GEVAZP 9.[27]. O caso analisado considera quatro reservatórios equivalentes de energia conforme topologia da figura 7.1. O modelo Newave é desenvolvido em linguagem Fortran e executado em sistema operacional Linux. Os casos a seguir foram executados em ambiente multiprocessado, utilizando um cluster com 4 nós e 12 processadores por nó. Para a resolução dos problemas de programação linear é utilizada a biblioteca do COIN para otimização.

De maneira a melhor analisar os efeitos dos aprimoramentos propostos neste trabalho, foram consideradas ainda algumas variantes dos casos estudados conforme o método de aversão a risco, de acordo com a nomenclatura definida na Tabela 3:

Tabela 3 – Casos estudados para nova metodologia da penalidade da SAR.

Caso	Descrição
Neutro	Caso sem considerar qualquer metodologia de aversão a risco
CVAR	Metodologia de aversão a risco CVAR com parâmetros $\alpha=50$ e $\lambda=25$
SAR-PenAnt-100	Metodologia da SAR com a formulação de penalização original (a todo período) e penalidade por não atendimento igual a 100R\$/MWh. Esta foi a variante escolhida como a mais adequada para a SAR nos estudos apresentados em 9.[10]
SAR-PenAnt-1000	Metodologia da SAR com a formulação de penalização a todo período e penalidade por não atendimento igual a 1000R\$/MWh
SAR-1000	Metodologia da SAR com a formulação de penalização proposta neste trabalho e com penalidade igual a 1000R\$/MWh
SAR-Term	Metodologia da SAR com a formulação de penalização proposta neste trabalho e com penalidade igual a 1170\$/MWh. Este valor é superior a térmica com custo mais elevado.
SAR-Def	Metodologia da SAR com a formulação de penalização proposta neste trabalho e com penalidade igual a 1370\$/MWh. Este valor é superior ao custo do primeiro patamar de déficit.

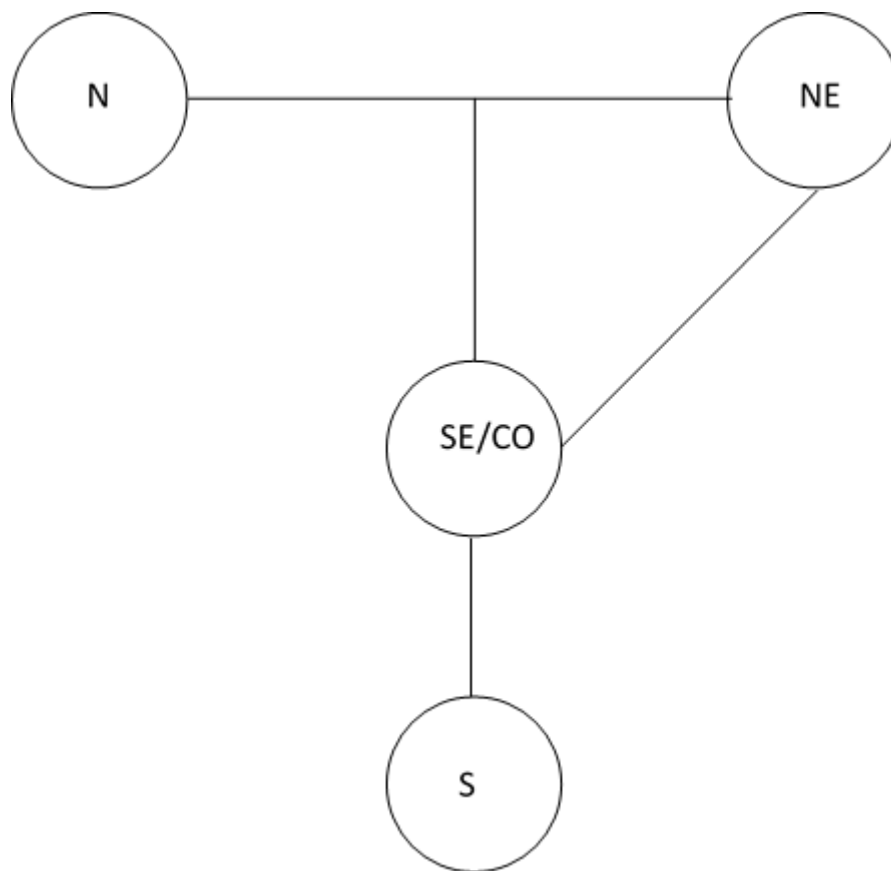


Figura 7.1 - Topologia dos subsistemas/submercados.

Para os casos que utilizam a SAR como metodologia de aversão a risco, foi considerada a SAR não condicionada e níveis meta de 47% para o Sudeste e 35% para o Nordeste ao final do mês de Novembro de cada ano. As restrições da SAR são construídas para os subproblemas referentes ao período de abril a outubro de cada ano.

7.1.1. Resultados da Operação

7.1.1.1. Convergência

Na figura 7.2 é apresentada a convergência do processo iterativo para os sete casos considerados.

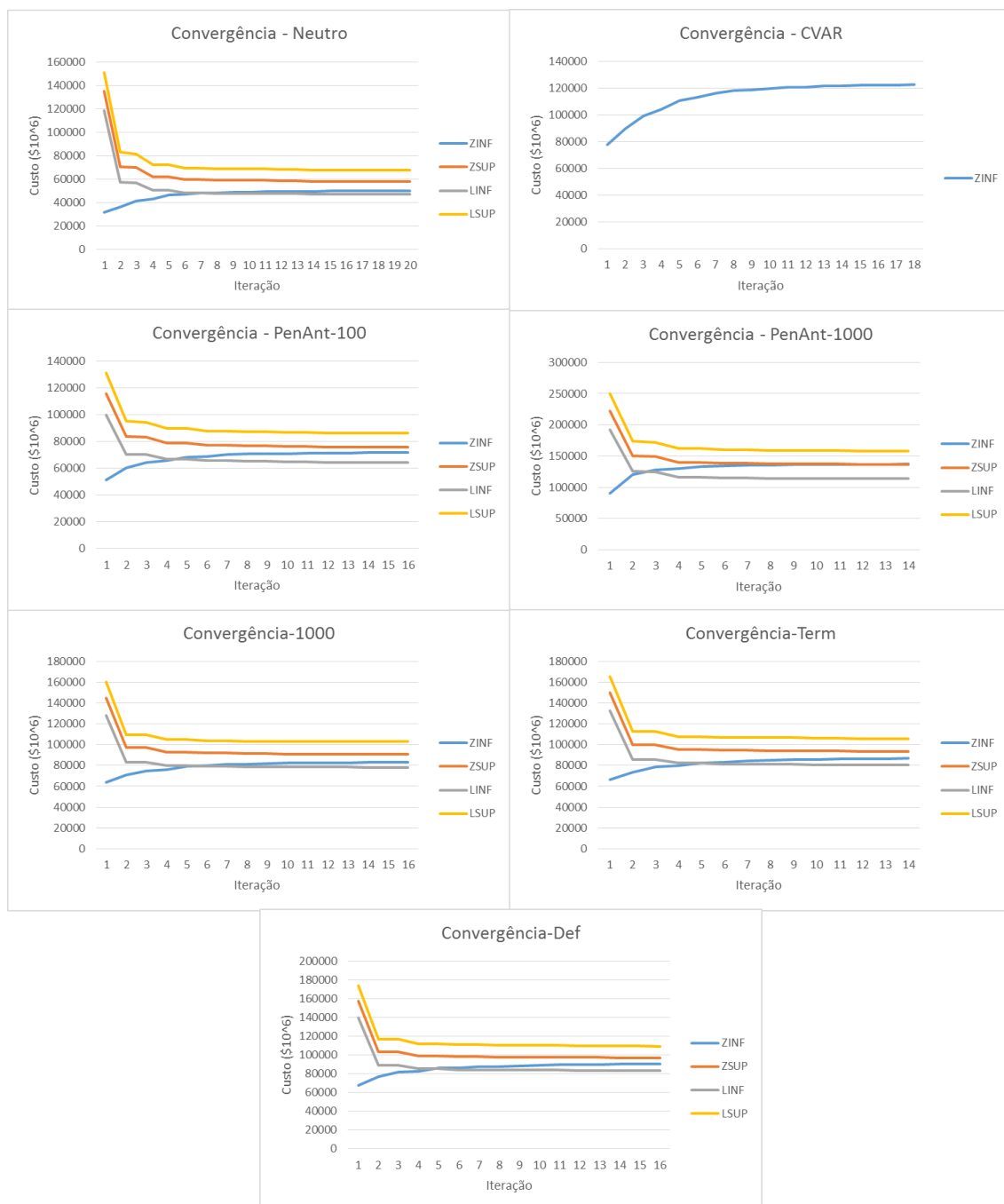


Figura 7.2 – Análise da convergência.

É importante ressaltar que no caso do CVAR não é possível o cálculo exato do valor do ZSUP, portanto para esta variante mostra-se apenas o valor de ZINF.

A o valor final de ZINF para o caso de SAR-1000 é um pouco superior ao caso SAR-PenAnt-100 e inferior ao caso SAR-PenAnt-1000. O maior valor de ZINF é observado para o caso CVaR. Como esperado o menor valor de ZINF é obtido no caso Neutro. Observa-se que o padrão de ZINF entre os casos é o mesmo.

7.1.2. Resultados da Simulação Final

A seguir são considerados os valores obtidos na simulação final do Newave considerando 2000 séries sintéticas de afluições. Os casos foram executados sem corte de carga por otimização, e desta forma a operação só apresentará déficit caso não exista nenhum recurso para atender a demanda de energia em determinado período. Este corte de carga por otimização é executado considerando o valor do custo do déficit superior ao valor do corte de Benders, fazendo com que o otimizador somente corte carga se não houver recurso para atender.

7.1.3. Custo Operativo

Na figura 7.5 apresenta-se o custo operativo, ou seja, a soma dos custos de geração térmica e custo de déficit.

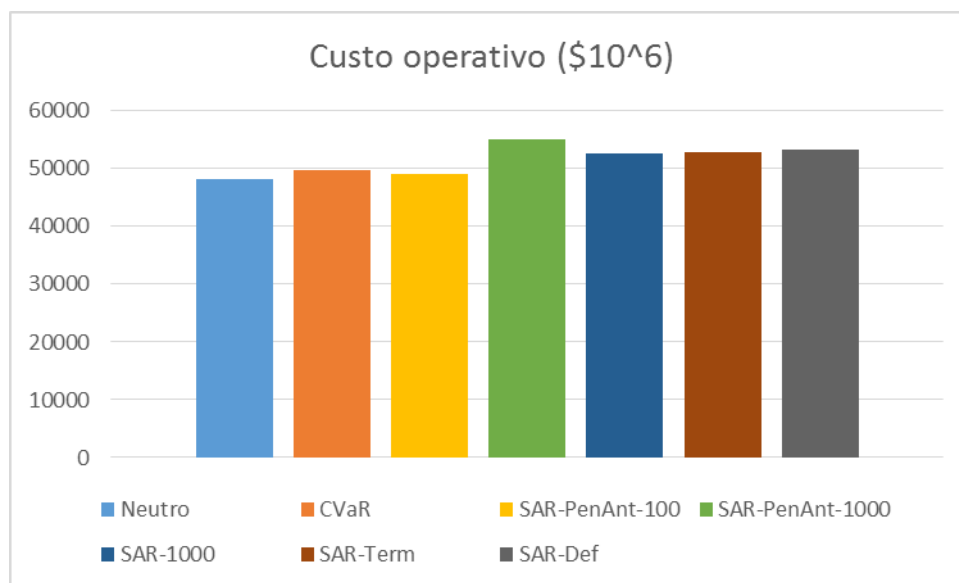


Figura 7.3 – Custo operativo sem corte de carga por otimização

O caso SAR-PenAnt-1000 é o caso que apresenta maior custo de operação. Os custos são equivalentes entre os casos da SAR com a nova metodologia e um pouco superiores ao caso com CVAR.

7.1.3.1. Risco de déficit

Como esperado, o risco para o caso Neutro é mais elevado que para os demais casos, exceto no ano de 2015 para o Sul. O caso SAR-1000 apresenta valores de risco equivalentes ao caso SAR-PenAnt-100 e um pouco inferior ao caso CVAR.

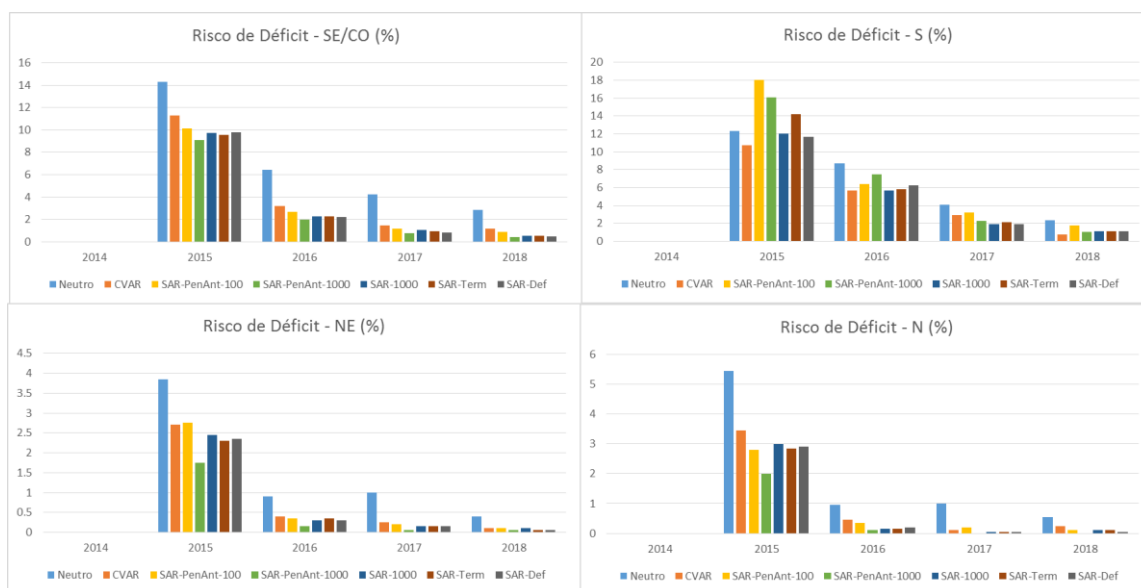


Figura 7.4 – Risco de déficit para os subsistemas/submercados sem corte de carga por otimização

7.1.3.2. Custo marginal de operação

Os valores dos custos marginais de operação para o caso SAR-PenAnt-1000 são extremamente elevados, apesar dos valores de risco de déficit ser menor que os demais. No caso SAR-1000 o valor do CMO é um pouco superior ao caso SAR-PenAnt-100. E para o caso CVAR, o valor do CMO é superior ao SAR-1000 no primeiro ano, inferior no segundo e equivalente nos demais.

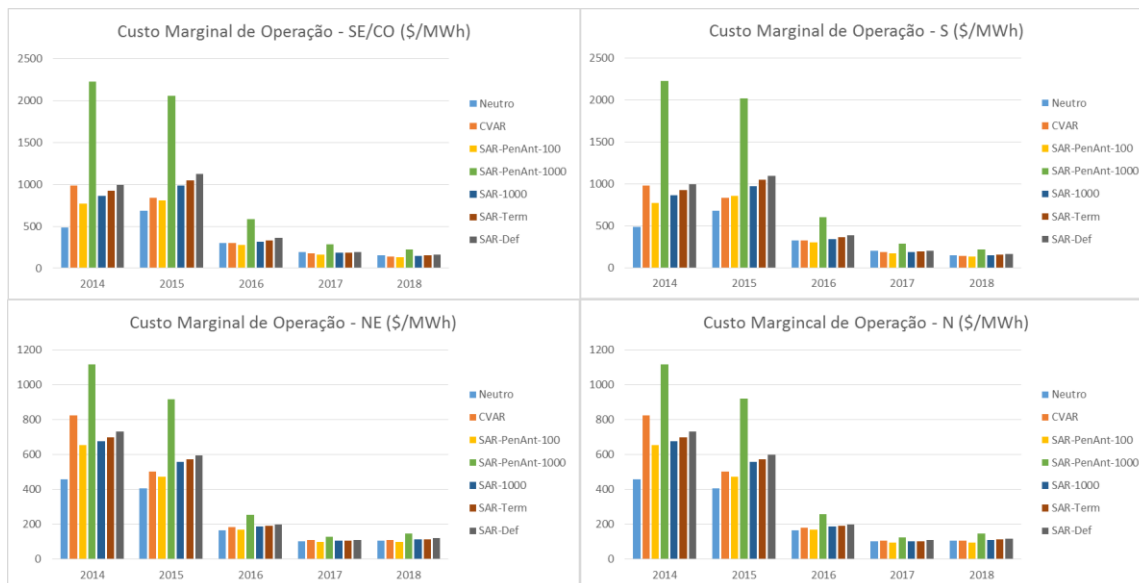


Figura 7.5 – Custo marginal de operação

Estes resultados mostram que com a nova metodologia para penalização da SAR é possível obter CMOs compatíveis com o caso SAR-PenAnt-100 e menores que o caso CVAR, utilizando valores de penalização mais intuitivos que estes dois casos, ou seja, valores próximos do primeiro patamar do custo de déficit.

7.1.3.3. Armazenamento

Nas figuras 7.8 e 7.9 são apresentados os valores do armazenamento final médio para os quatro reservatórios equivalentes de energia e para o SIN, que é o somatório do armazenamento de todos os reservatórios equivalentes.

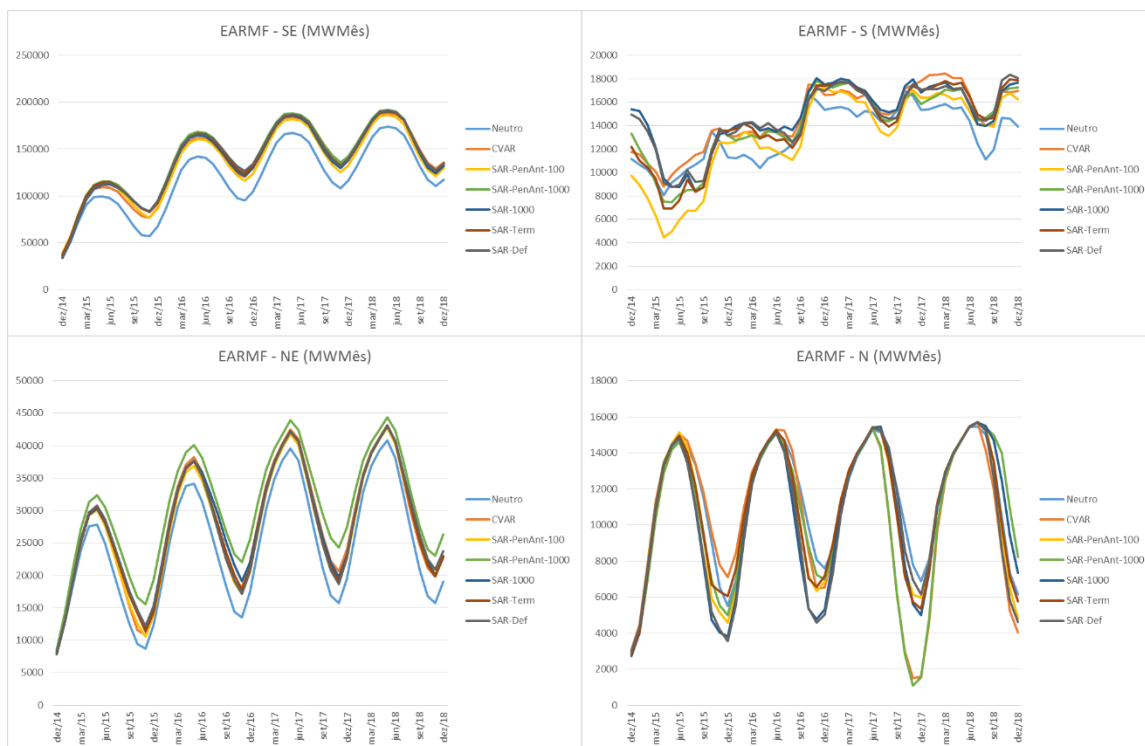


Figura 7.6 - Energia armazenada final para cada reservatório equivalente.

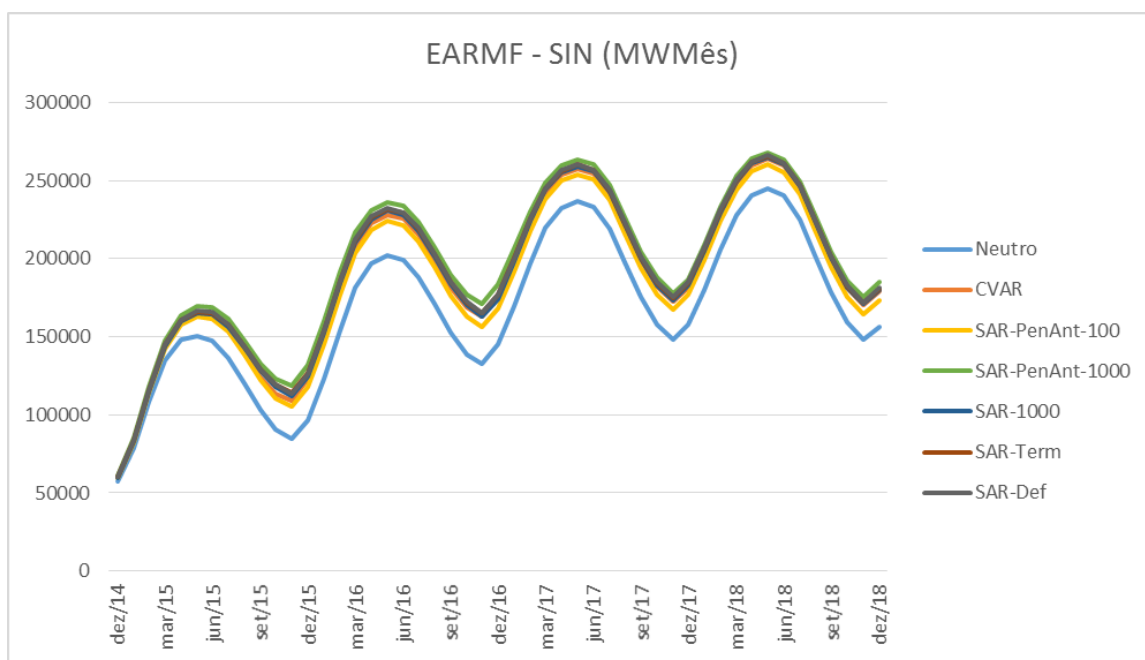


Figura 7.7 – Energia armazenada final média mensal para o SIN

Observa-se que os valores de armazenamento para o caso Neutro a risco são inferiores aos demais casos. O caso PenAnt-1000 apresenta os maiores níveis de armazenamento para o SIN e o caso PenAnt-100 apresenta valores de armazenamento inferiores aos casos considerando a nova metodologia da SAR. O caso CVAR tem um armazenamento

ligeiramente inferior ao caso SAR-1000. Com a nova metodologia para SAR é possível obter armazenamentos superiores que o SAR-PenAnt-100, com valores mais intuitivos para a penalidade.

7.1.3.4. Distribuição de Armazenamento para Novembro

O objetivo da SAR é manter os níveis de armazenamentos elevados ao final do período seco (mês de novembro). Para mostrar este efeito, nas figuras 7.10 e 7.11 são apresentadas as curvas de permanência do armazenamento final percentual para os reservatórios equivalentes de energia Sudeste e Nordeste ao final de Novembro de cada ano do estudo.

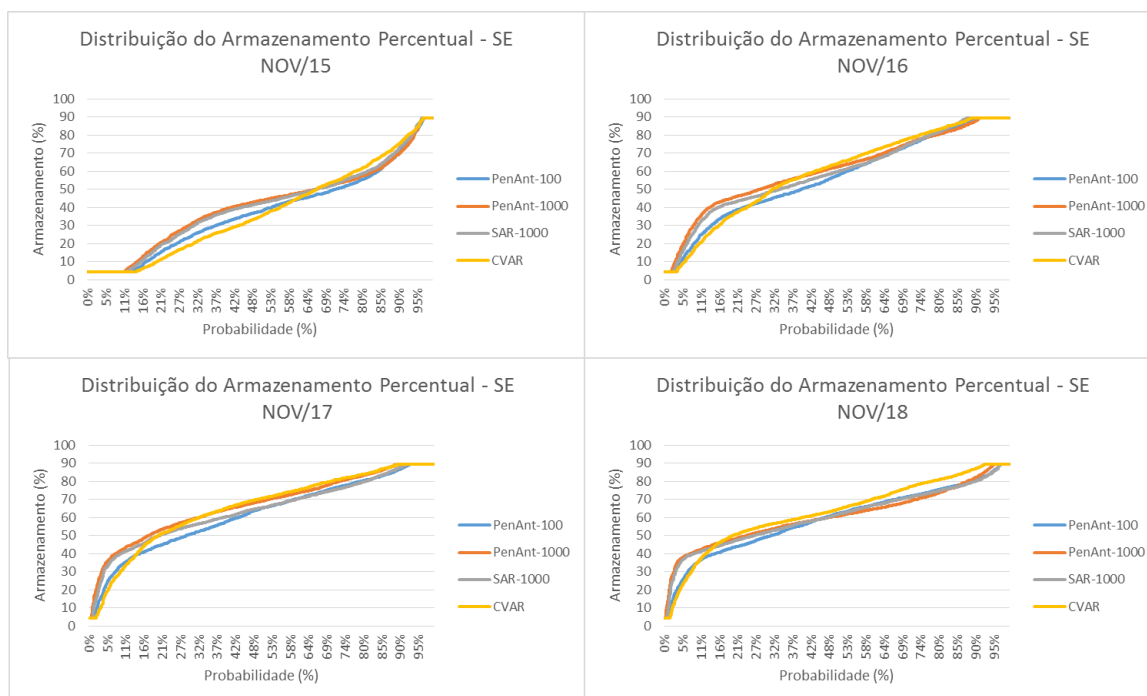


Figura 7.8 – Distribuição de armazenamento final percentual do Sudeste para novembro.

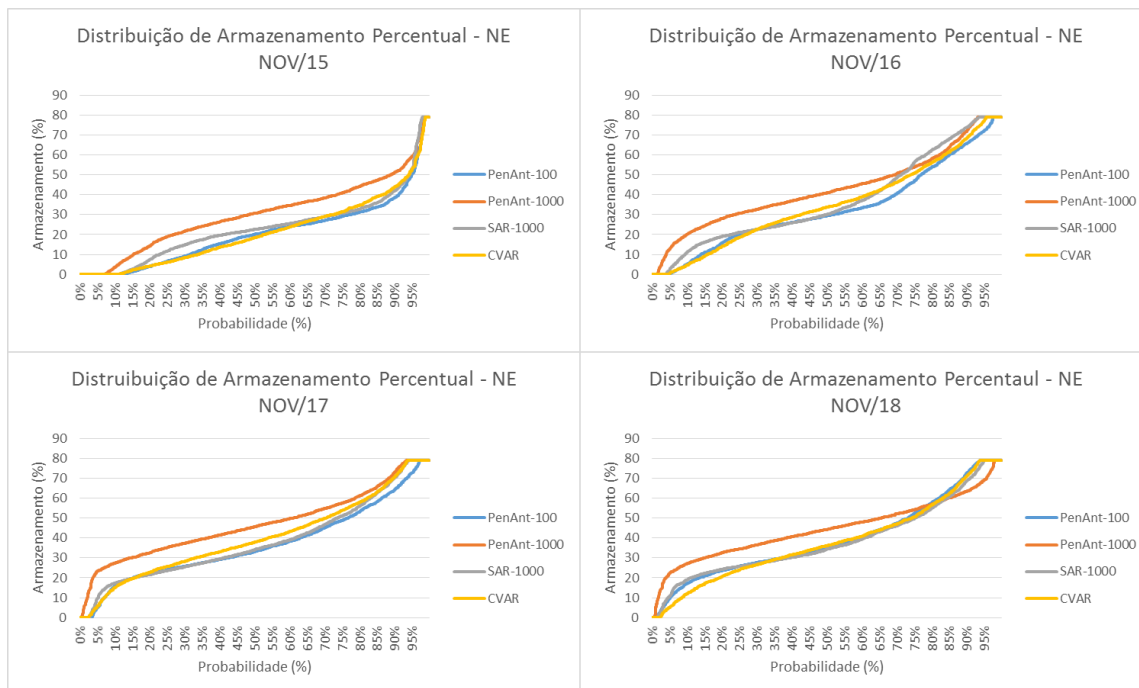


Figura 7.9 – Distribuição de armazenamento final percentual do Nordeste para novembro.

A distribuição de armazenamento final para o Nordeste é equivalente entre os casos SAR-PenAnt-1000 e SAR-1000, sendo que o caso SAR-1000 apresenta um valor de custo marginal de operação bastante inferior ao caso PenAnt-1000, o que é uma vantagem por não impactar tanto o preço da energia. Os valores de armazenamento para esses dois casos são superiores aos armazenamentos dos SAR-PenAnt-100 e CVAR, para armazenamentos baixos, que é objetivo de proteção da SAR. Para o Nordeste em níveis de armazenamento baixos, os valores do caso SAR-1000 são equivalentes no ano de 2017 e superiores no ano de 2015 e 2018 comparados ao CVAR. Assim, as distribuições mostram que para o caso SAR-1000 com um valor intuitivo para penalidade, é possível obter níveis de armazenamento para o período seco compatíveis ou superiores a SAR-PenAnt-100 e CVAR.

7.1.3.5. Geração Térmica

Nas figuras 7.12 e 7.13 apresentam-se os valores médios de geração térmica média mensal para os quatro submercados/subsistemas e para o SIN, que é o somatório de todos os subsistemas/submercados.

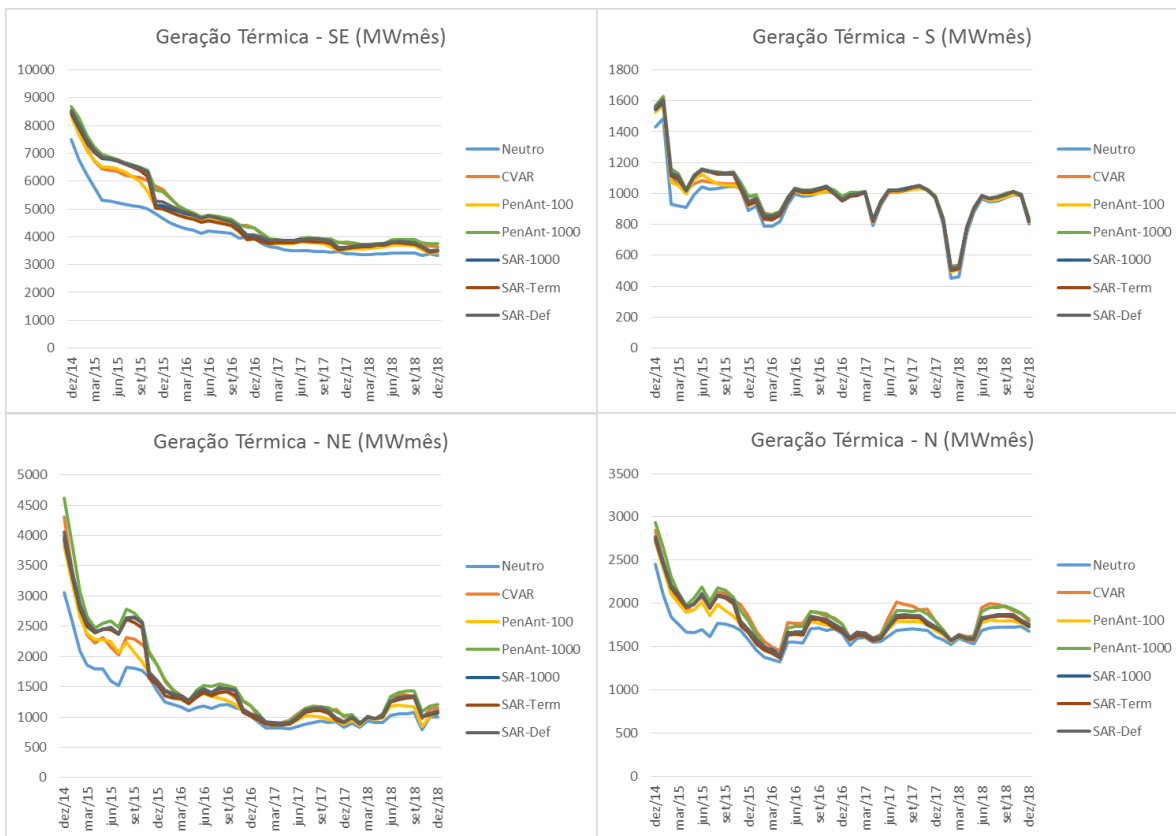


Figura 7.10 - Geração térmica média mensal para os submercados/subsistemas.

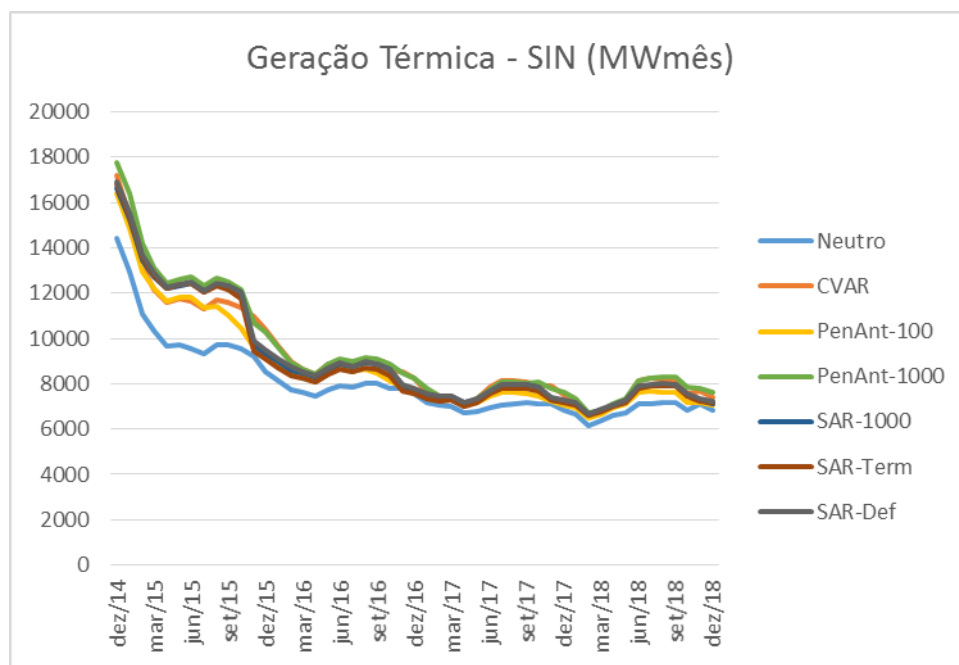


Figura 7.11 – Geração térmica média mensal para o SIN.

Os valores de geração térmica para os casos são equivalentes. No caso Neutro como não existe nenhum tipo de aversão a risco para manter os níveis dos reservatórios elevados, a

geração térmica é inferior aos demais casos. Com o caso SAR-1000 é possível obter níveis de proteção compatíveis com os demais casos, sem aumentar a geração térmica.

7.1.3.6. Déficit

O valor de déficit para cada mês é o somatório dos déficits em cada patamar de carga e cada patamar de déficit. Conforme observado nos valores anuais para o déficit de energia, o caso Neutro apresenta valores mais elevados e o caso que apresenta menor déficit para o SIN é o caso PenAnt-1000. Os casos com a nova metodologia para penalização da SAR apresentam déficits inferiores aos casos SAR-PenAnt-100 e CVAR.

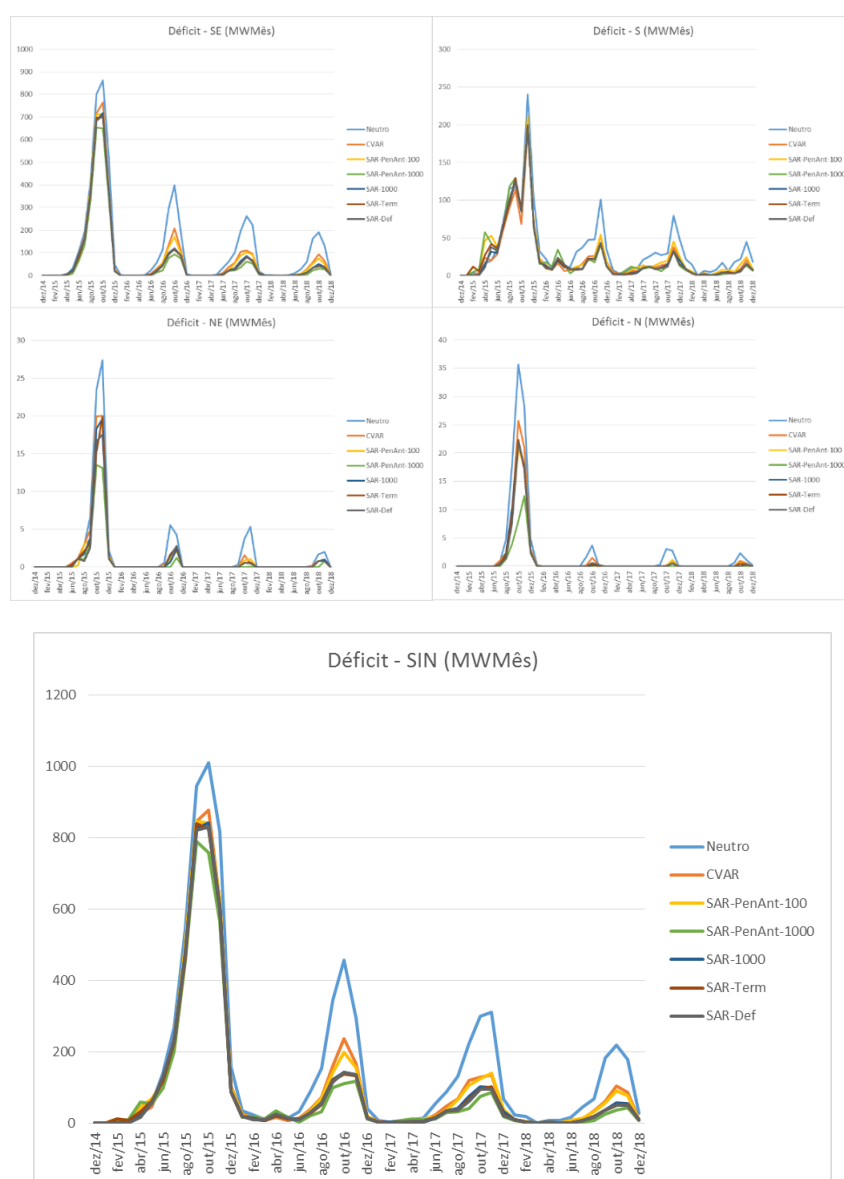


Figura 7.12 – Déficit médio mensal para os submercados/subsistemas e para o SIN.

7.1.3.7. CMO

Como visto nos valores anuais, o custo marginal de operação para o caso SAR-PenAnt-1000 são os que apresentam os maiores valores. O caso PenAnt-100 tem valores menores que os casos com a nova metodologia para penalização da SAR. Para valores de CMOs próximos ao PLD máximo, a nova metodologia pode apresentar valores menores.

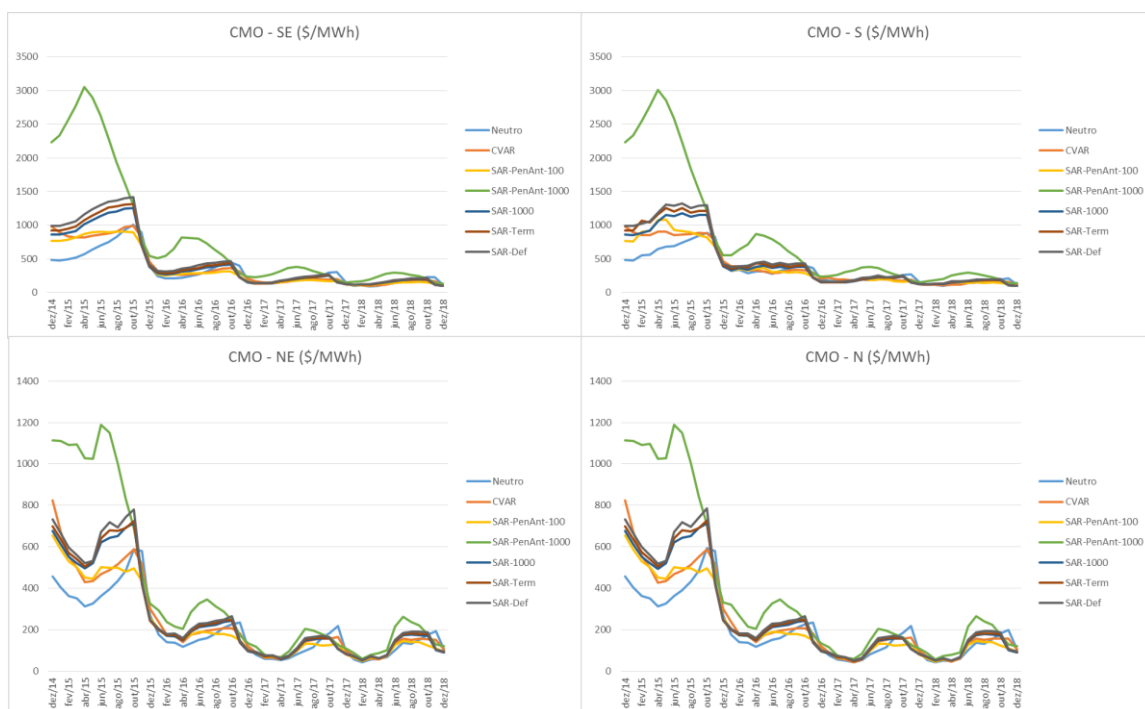


Figura 7.13 – Custo marginal de operação médio mensal para os submercados/subsistemas.

7.1.3.8. Geração hidráulica total

O valor da geração hidráulica total é a soma geração hidráulica nas usinas com reservatório mais a geração hidráulica nas usinas a fio d'água em todos os patamares de carga.

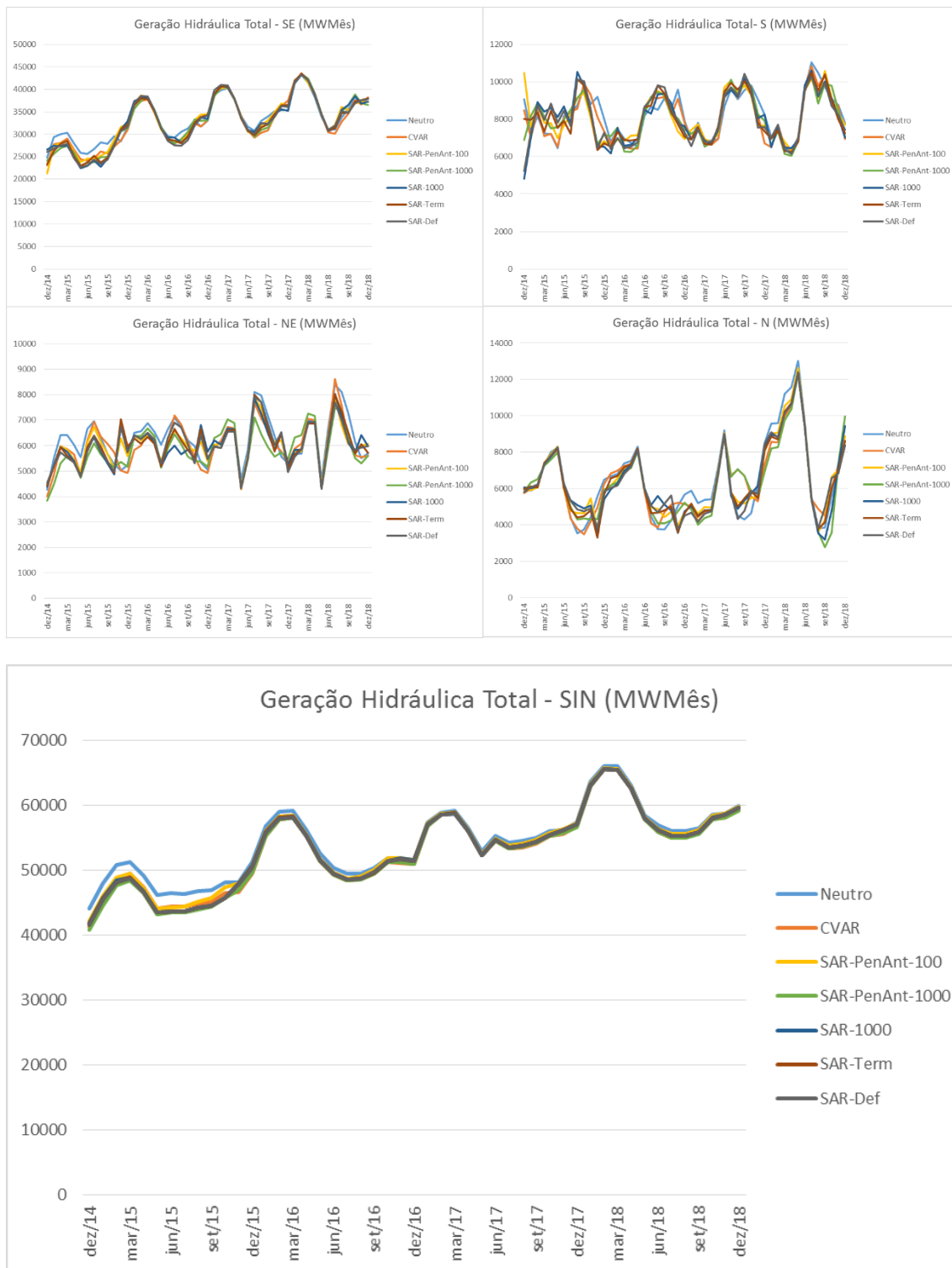


Figura 7.14 - Geração hidráulica média mensal para os reservatórios equivalentes de energia e para o SIN.

A geração hidráulica total média para todos os caso é equivalente, conforme figura 7.16, apenas no primeiro ano a geração para o caso Neutro é um pouco superior as demais.

7.1.3.9. Vertimento

Conforme figuras 7.17 e 7.18, os valores de vertimento para os casos são equivalentes, exceto para o caso Neutro, que apresenta valores inferiores de vertimento.

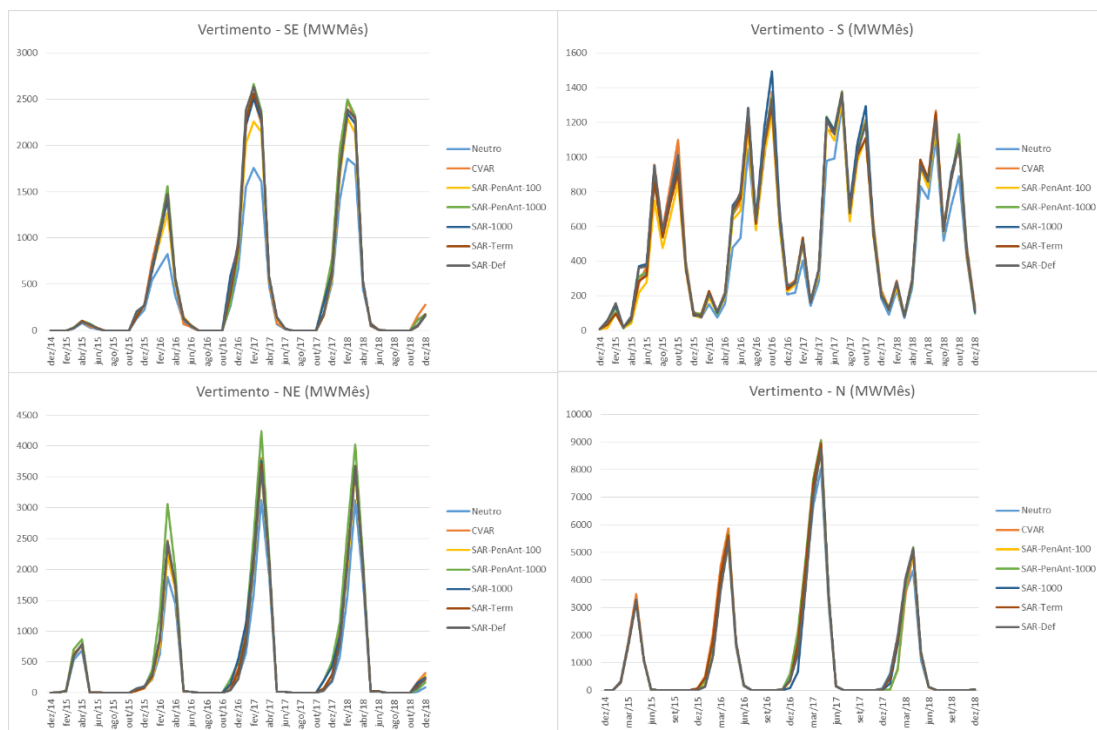


Figura 7.15 - Vertimento médio mensal para os reservatórios equivalentes de energia e para cada reservatório equivalente de energia.

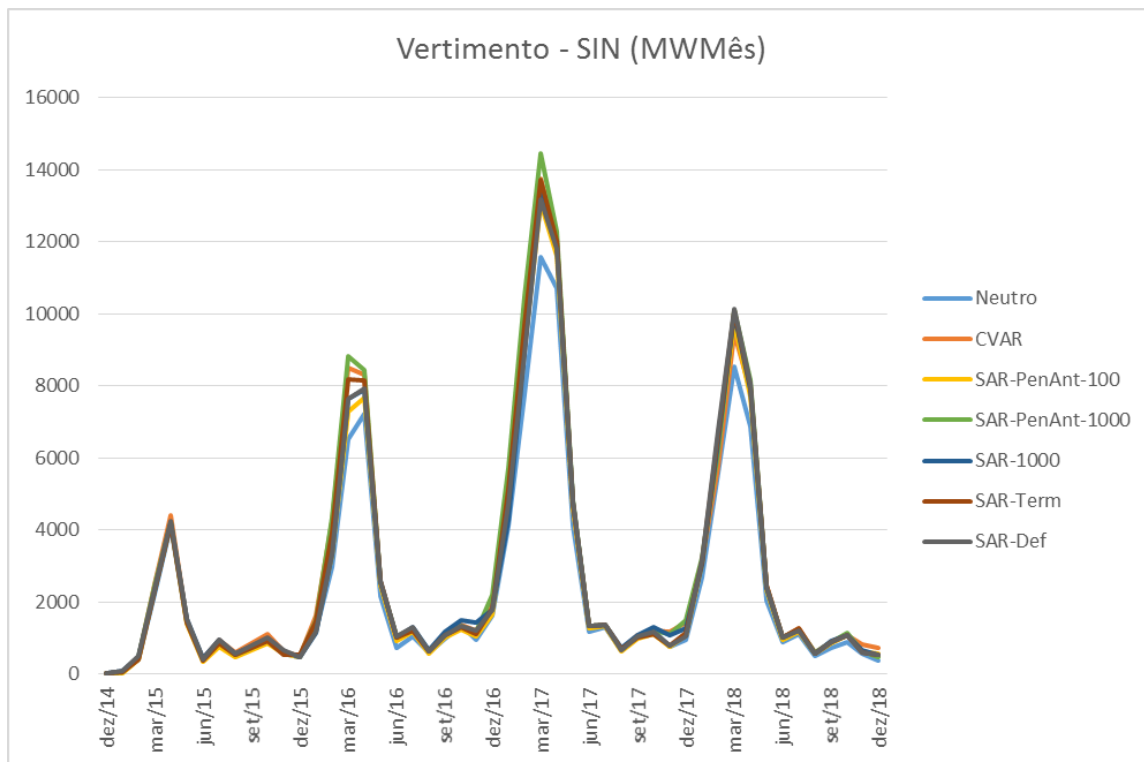


Figura 7.16 – Vertimento médio mensal para os reservatórios para o SIN.

7.1.4. Comentários

Conforme os resultados acima, com a nova metodologia para penalidade da SAR é possível obter resultados tão bom quanto os obtidos com a metodologia anterior com a penalidade de 1000 e o caso CVaR, porém sem o aumento excessivo no custo marginal de operação.

Os valores de armazenamento para o período seco para a nova metodologia apresentam valores mais elevados que o caso CVaR e equivalentes ao caso SAR-PenAnt-1000.

Finalmente, com esta nova metodologia não há o acúmulo de penalidade e é possível obter valores mais intuitivos para penalidade. Foram testadas também variações para o valor da penalidade como um pouco superior à térmica mais cara e o custo um pouco superior ao déficit, e esses casos apresentaram resultados próximos aos da penalidade de 1000.

7.1.5. Eficiência do uso da SAR:

Com o objetivo de avaliar a eficiência do processo da SAR foi analisada a quantidade de violações dessas restrições para três situações:

- caso "1000-1000", onde se constrói a política de acordo com a variante SAR-1000, executando a simulação final com a função de custo futuro desse mesmo caso;
- caso "Neutro-Neutro", onde se constrói a política de acordo com a variante NEUTRO, executando a simulação final com a função de custo futuro desse mesmo caso;
- caso "Neutro-1000", onde se constrói a política de acordo com o caso Neutro, executando a simulação final com as restrições da SAR construídas durante a política do caso SAR-1000;

Supondo que as restrições da SAR foram construídas corretamente, ou seja, com essas restrições é possível atender ao nível meta ao final do período seco sem a ocorrência de déficit, o objetivo desta análise é verificar se ao executar o caso considerando essas restrições a ocorrência de violações dessas restrições é reduzida. Como o caso que considera a função de custo futuro neutra à risco não tem coeficiente para a violação da SAR foi considerado o valor da penalidade. Como para o caso Neutro a risco não há restrição SAR e assim não é possível obter qual o percentual de violação, então foi comparado o armazenamento obtido com as restrições construídas durante a SAR-1000 e contabilizado quantas restrições não seriam atendidas.

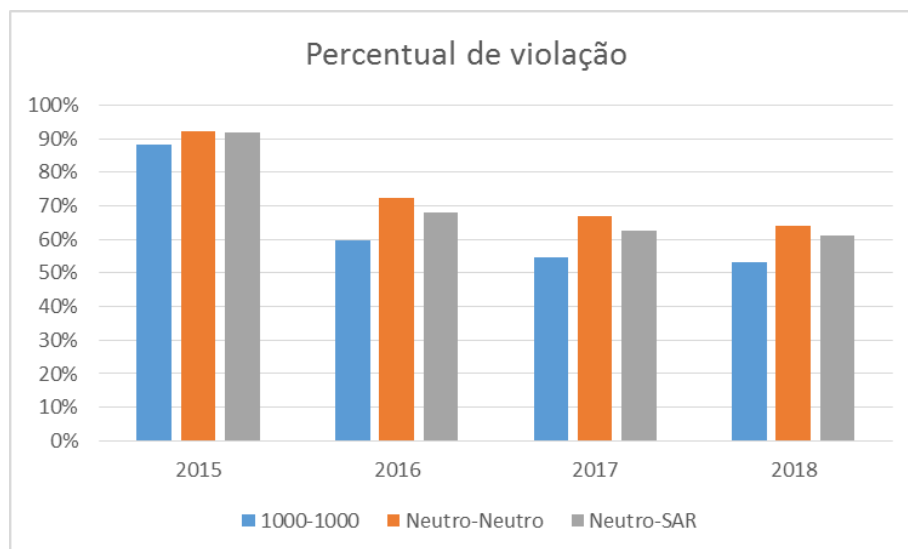


Figura 7.17 - Percentual de violação das restrições da SAR.

É possível observar uma redução no caso Neutro-SAR há uma redução no número de violações, ou seja, mesmo a política sendo construída neutra à risco, as restrições da SAR contribuem para a elevar o nível dos reservatórios. O caso 1000-1000 é o que apresenta o menor nível de violação, o que era esperado pois tanto a função de custo futuro quanto a simulação consideraram aversão à risco.

7.1.6. Tipos de restrição

A SAR é uma restrição de combinação de armazenamento dos diversos reservatórios equivalentes do sistema. Na tabela 4 é apresentada a quantidade de restrições que foram inseridas por tipo de restrição. O tipo de restrição representa quais os reservatórios equivalentes de energia tem coeficiente na restrição da SAR diferente de zero: o tipo 1 são as restrições que só envolvem o Sudeste; o tipo 2 são as restrições que só envolvem o Sul; o tipo 3 as que envolvem só o Nordeste e assim por diante.

Tabela 4 – Quantidade de restrições por tipo de restrição

	Sistema				Quantidade	Percentual
	Sudeste	Sul	Nordeste	Norte		
1	x	0	0	0	75	0.89%
2	0	x	0	0	0	0.00%
3	0	0	x	0	18	0.21%
4	0	0	0	x	15	0.18%
5	x	x	0	0	416	4.93%

6	x	0	x	0	51	0.60%
7	x	0	0	x	7	0.08%
8	0	x	x	0	0	0.00%
9	0	x	0	x	0	0.00%
10	0	0	x	x	13	0.15%
11	x	x	x	0	250	2.96%
12	x	x	0	x	13	0.15%
13	x	0	x	x	982	11.63%
14	0	x	x	x	0	0.00%
15	x	x	x	x	6603	78.21%

A grande maioria de restrições envolve todos os reservatórios equivalentes de energia, seguida por restrições que envolvem os reservatórios do Sudeste, Nordeste e Norte. A seguir são apresentados, a título de exemplo, os coeficientes de algumas restrições da SAR para cada tipo de restrição.

Tabela 5 – Exemplos de restrições por tipo de restrição

	Sistema				RHS
	Sudeste	Sul	Nordeste	Norte	
1	-1.00830	0.00000	0.00000	0.00000	113570.6221
2	-	-	-	-	-
3	0.00000	0.00000	-1.00390	0.00000	16716.3410
4	0.00000	0.00000	0.00000	-1.01114	86.6555
5	-1.02362	-0.15231	0.00000	0.00000	122882.2952
6	-1.00876	0.00000	-1.00390	0.00000	114240.6462
7	-1.01471	0.00000	0.00000	-1.03933	115832.4134
8	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	0.00000	0.00000	-1.00430	-1.03491	19749.0266
11	-1.01197	-0.08364	-0.99859	0.00000	140885.4619
12	-1.01857	-0.088790	0.00000	-1.03933	116615.3640
13	-1.01857	0.00000	-2.00340	-1.01729	145116.8779
14	-	-	-	-	-
15	-1.02362	-1.03352	-1.02055	-1.03741	163837.3334

7.2 Eficiência da SAR a priori

Conforme descrito anteriormente na seção 5.2, na metodologia atual da SAR, ao final da resolução de cada problema da PDDE o vetor de armazenamentos é utilizado para resolver um problema adicional ("subproblema da SAR") com o objetivo de atender a um dado nível meta de armazenamento sem a ocorrência de déficit considerando uma afluência crítica. Se neste problema a função objetivo for diferente de zero, são

construídas restrições que são adicionadas ao subproblema da PDDE e este é resolvido novamente. Este processo iterativo ocorre até que a função objetivo seja igual a zero ou seja alcançado o número de 5 iterações.

Para avaliar a eficiência da SAR a priori em reduzir o tempo computacional foram executados os seguintes casos:

Tabela 6 - Casos analisados

Caso	Descrição
Caso0	Não são construídas restrições a priori: somente durante o processo de convergência da PDDE.
CasoX	Cada reservatório equivalente é discretizado em X pontos para construção da SAR a priori, e também são construídas restrições durante o processo de convergência da PDDE.
CasoX-SS	Cada reservatório equivalente é discretizado em X pontos para construção da SAR a priori. Não são construídas restrições durante o processo de convergência da PDDE.

Para os casos aqui analisados o valor X equivale ao número de pontos para discretização dos níveis de armazenamento, e foram considerados os valores de 3,5,7 e 9.

7.2.1. Tempo por iteração

Na figura 7.20 é apresentado o tempo em segundos por iteração do processo de convergência da PDDE. É possível observar que o tempo dos casos que constroem restrições da SAR durante o processo de convergência é significativamente superior aos demais.

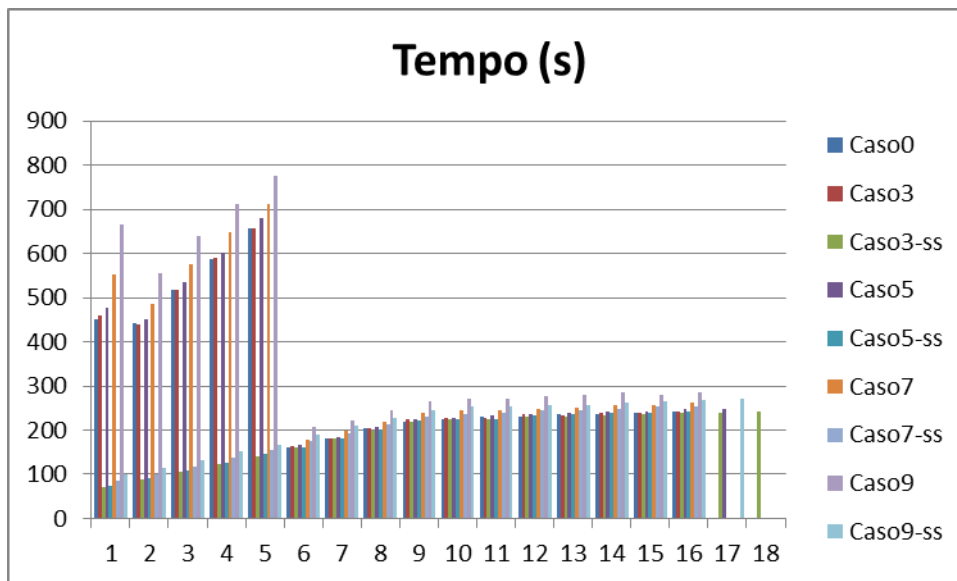


Figura 7.18 – Tempo por iteração

Como só são construídas restrições da SAR até a quinta iteração da PDDE, a figura 7.21 mostra o tempo até a quinta iteração, onde a diferença de tempo entre os casos que constroem SAR somente a priori e os casos que constroem também durante o processo de convergência da PDDE é mais acentuada. Isto mostra que resolver um problema de otimização adicional aumenta consideravelmente o tempo computacional do modelo NEWAVE.

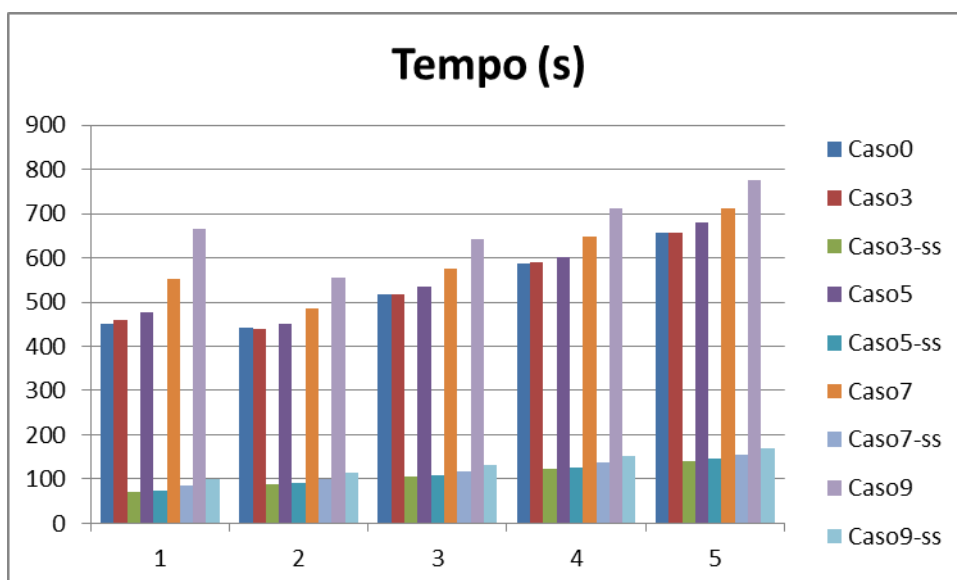


Figura 7.19 – Tempo por iteração até a quinta iteração.

7.2.2. Resultado da operação

Em princípio, os casos que constroem SAR durante o processo iterativo da PDDE representam melhor a superfície da aversão a risco, pois neste caso é possível visitar estados intermediários dentre aqueles visitados na SAR a priori. Portanto, é importante avaliar se a qualidade dos resultados é equivalente entre as duas opções de calcular a SAR a priori (proposta neste trabalho) ou calcular a SAR durante a posteriori, durante a PDDE. Na avaliação dos resultados são consideradas 2000 séries sintéticas de afluência.

7.2.2.1. Custo operativo

Como apresentado na tabela 5 os custos operativos não sofrem variações significativas entre os casos apresentados com construção de SAR durante o processo iterativo da PDDE e os casos que constroem SAR somente a priori.

Tabela 7 – Custo de operação

Caso	Custo
Caso0	51415.25
Caso3	51359.65
Caso3-ss	51368.69
Caso5	51317.77
Caso5-SS	51331.78
Caso7	51371.32
Caso7-SS	51282.63
Caso9	51394.63
Caso9-SS	51239.03

7.2.2.2. Custo Marginal de operação

Assim como nos custos operativos, não há grandes variações nos resultados do custo marginal de operação para os quatro subsistemas/submercados. As variações observadas não demonstram nenhum viés notável quanto a aumento ou redução do CMO devido a uma melhor discretização para cálculo a priori da superfície de aversão a risco.

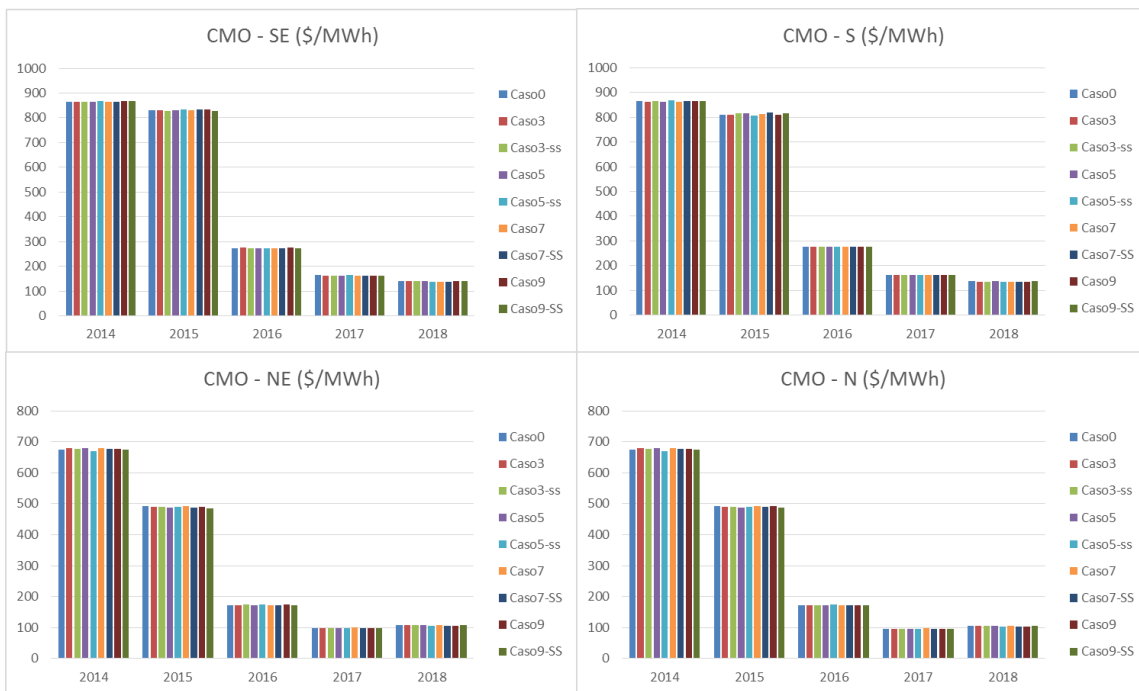


Figura 7.20 - Custo marginal de operação

7.2.2.3. Risco de Déficit

O risco de déficit apresenta maiores variações que o custo operativo e o custo marginal de operação. Mas assim como no CMO, as variações não indicam um viés que identifique que os casos que constroem a SAR a priori apresentam valores superiores ou inferiores aos demais.

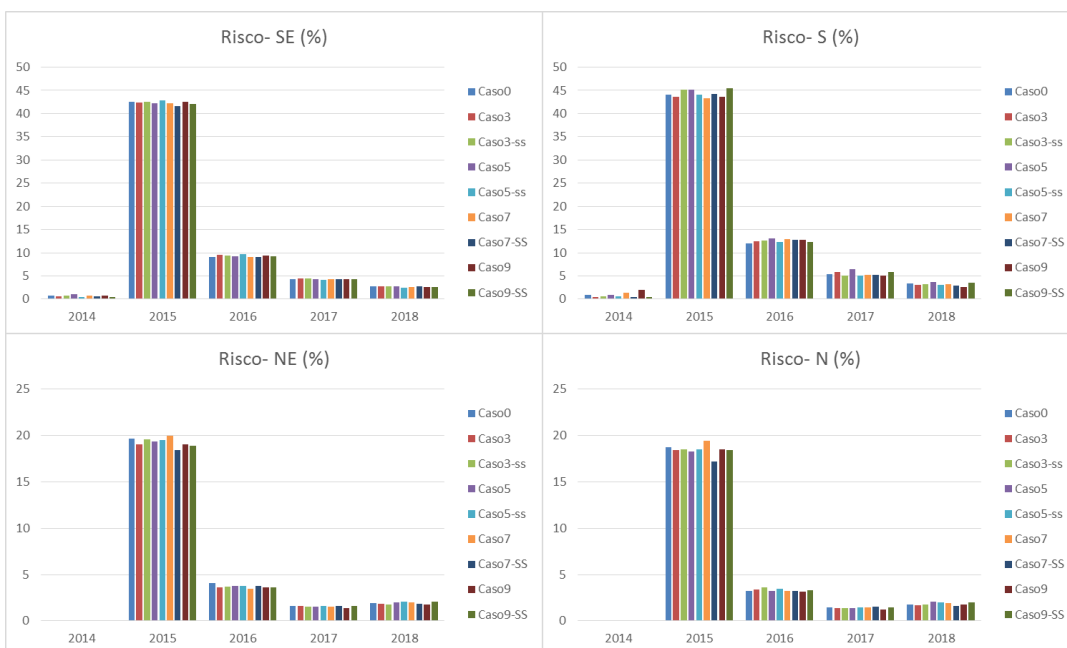


Figura 7.21 – Risco de déficit

7.2.2.4. Tempo total para simulação do Newave

Os tempos para os casos somente com SAR a priori são consideravelmente inferiores. Na tabela 7 apresentam-se os tempos totais, a redução de tempo em relação ao Caso0 e o número de iterações. A redução percentual é em torno de 30%, porém os casos não estão com o mesmo número de iterações.

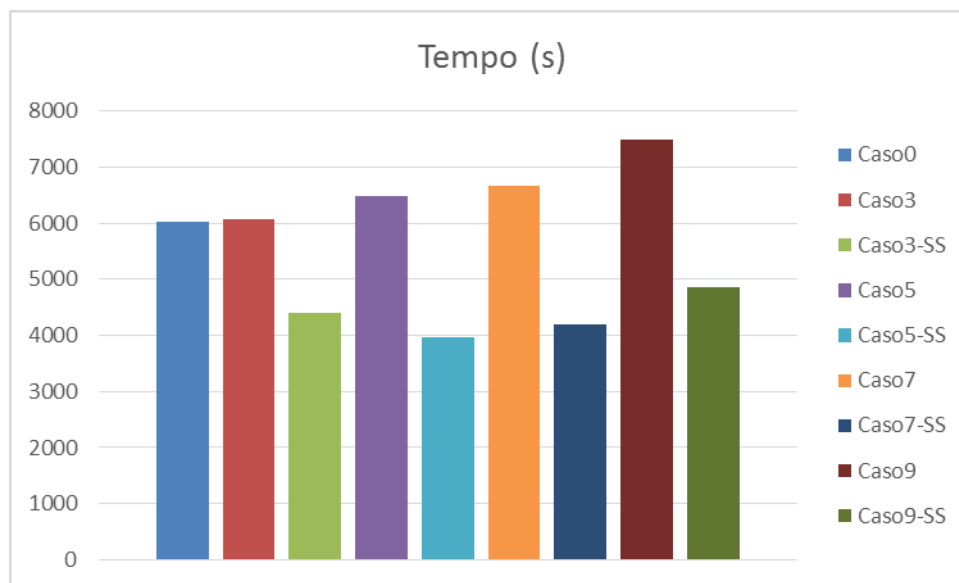


Figura 7.22 – Tempo total de simulação

Tabela 8 – Redução no tempo total de simulação

Caso	Tempo(s)	Redução(%)	NITE
Caso0	6031		16
Caso3	6067	-1%	16
Caso3-SS	4412	27%	18
Caso5	6479	-7%	17
Caso5-SS	3958	34%	16
Caso7	6656	-10%	16
Caso7-SS	4201	30%	16
Caso9	7480	-24%	16
Caso9-SS	4855	19%	17

A princípio não há razão para número de iterações ser influenciado pela construção da SAR a priori. Para uma avaliação mais justa, os casos foram executados considerando o mesmo número de iterações para analisar a redução percentual. Para estes casos a redução de tempo ao construir somente SAR a priori é em média igual a 27,8%.

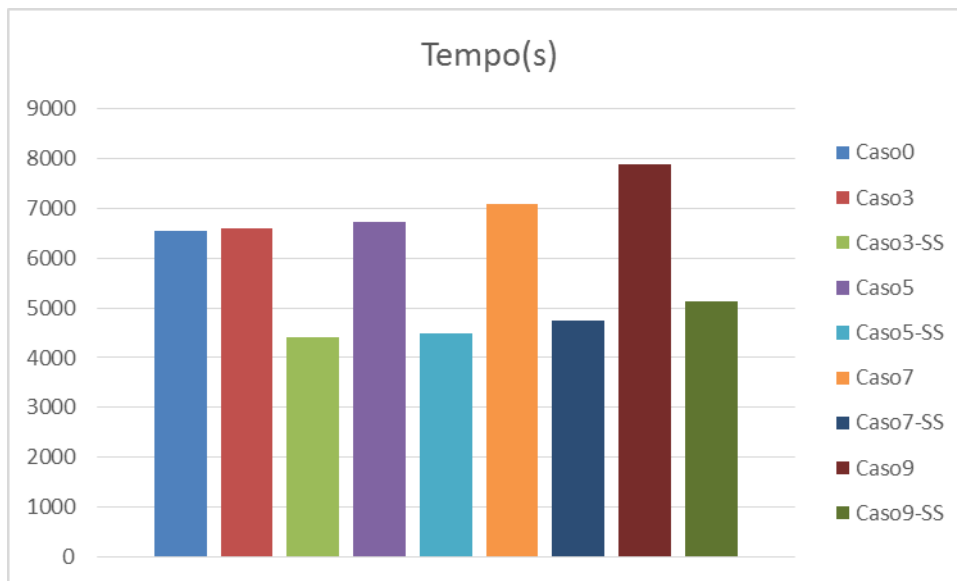


Figura 7.23 – Tempo total com número fixo de iterações.

Tabela 9 – Redução no tempo total de simulação com número fixo de iterações.

Caso	Tempo(s)	Redução(%)	Nite
Caso0	6543		18
Caso3	6603	-1%	18
Caso3-SS	4417	32%	18
Caso5	6729	-3%	18
Caso5-SS	4491	31%	18
Caso7	7079	-8%	18
Caso7-SS	4750	27%	18
Caso9	7873	-20%	18
Caso9-SS	5139	21%	18

7.2.2.5. Speedup e eficiência considerando o modelo Newave com SAR a priori

O speedup é um índice que indica quanto o programa computacional reduz o tempo com o aumento do número de processadores. Este índice é calculado como a razão entre o tempo de execução do programa com N processadores e o tempo de execução do programa com um processador, conforme a equação abaixo:

$$Sp = \frac{T_1}{T_p}$$

A eficiência mostra se os recursos computacionais estão sendo bem aproveitados. Este índice é calculado como a razão entre o speedup e o número de processadores(p), conforme equação a seguir:

$$E = \frac{Sp}{p} \times 100\%$$

Apesar de ter sido observada uma redução considerável no tempo total de execução do modelo Newave com a consideração da SAR a priori, também é necessário avaliar os índices de desempenho com o objetivo de analisar se o procedimento para a construção das restrições a priori influencia no fator de aceleração e na eficiência do modelo. Nas figuras 7.26 e 7.27 são apresentados os resultados para o fator de aceleração (speedup) e eficiência para uma execução completa do Newave.

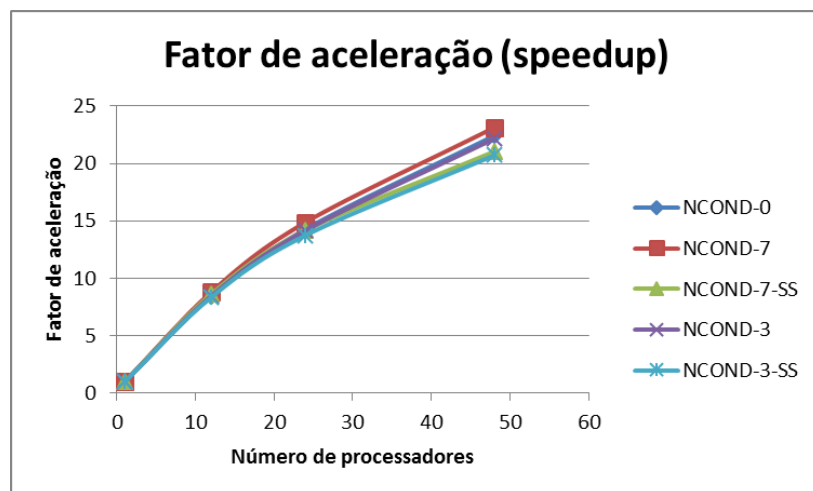


Figura 7.24 - Fator de aceleração do programa Newave.

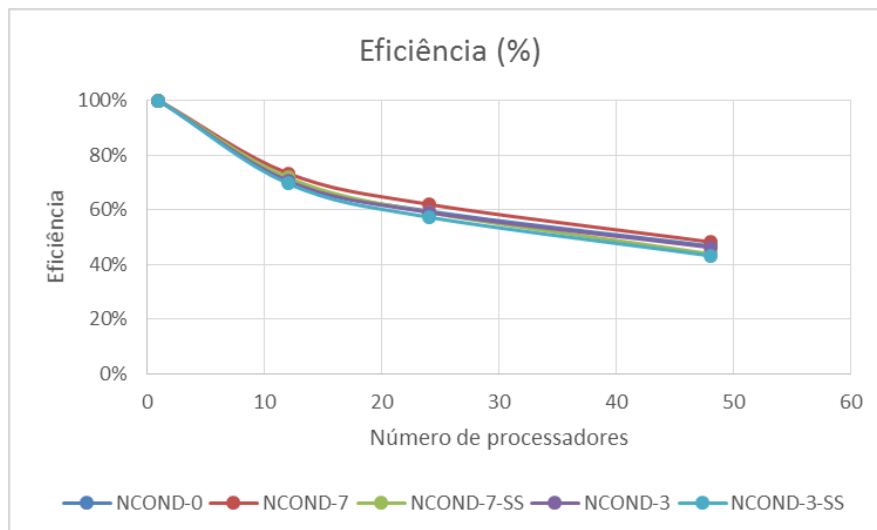


Figura 7.25 - Eficiência do modelo Newave.

É possível observar que as curvas de speedup e eficiência para os casos analisados não se alteram consideravelmente. Assim é possível utilizar qualquer uma das duas metodologias que o fator de aceleração e eficiência não são afetados de forma relevante.

8. Conclusões

O presente trabalho foi aplicado no contexto do modelo NEWAVE, utilizado no planejamento de médio/longo prazo para o sistema hidrotérmico brasileiro considerando aversão a risco. Neste trabalho foi analisada a aversão a risco utilizando a Superfície de aversão a risco (SAR), que foi concebida originalmente com uma forma de penalização que acaba resultando em um acúmulo de penalidades e as restrições da SAR são construídas durante o processo de convergência da PDDE. Na implementação original da metodologia da SAR os resultados não eram tão satisfatórios quanto os do CVaR, assim este trabalho tenta suprir duas deficiências: elevado tempo computacional e perda do valor intuitivo a ser utilizado para penalização da violação das restrições da SAR.

A primeira proposta do trabalho consiste em uma modificação na forma da penalização pelo não atendimento as restrições da SAR, com o objetivo de não ocorrer acúmulos dessas penalidades que causam um aumento no valor da água e dificultam a escolha do valor a ser utilizado para penalidade. Conforme apresentado no capítulo de resultados, os valores de custo operativo e custo marginal de operação para o caso considerando a nova forma de penalização são significativamente inferiores ao caso que utiliza o mesmo valor de penalidade porém com a metodologia anterior. Os valores de armazenamento ao final do período seco e de risco de déficit são equivalentes entre os dois casos.

Durante as reuniões de validação da SAR pela CPAMP, como não era possível escolher um valor intuitivo para penalização da SAR, foram executados testes e escolhido o valor de 100\$/MWh, pois este apresentava resultados equivalentes aos casos do CVAR, que foi a metodologia que entrou em vigor oficialmente. Os resultados mostram que o caso SAR-1000 apresentam resultados tão bons quanto esses dois casos, resgatando assim o sentido intuitivo da penalidade, já que este valor é próximo do primeiro patamar do custo de déficit.

A outra proposta do trabalho foi buscar uma redução do tempo computacional com a construção da SAR a priori, evitando assim a necessidade de resolver um problema de otimização adicional durante a convergência da PDDE. Para a construção desta SAR a priori é necessária a discretização das variáveis de estado e resolver subproblemas da SAR para cada valor de discretização, em cada período de estudo. Como o número de problemas é elevado, foram utilizadas técnicas de processamento paralelo reduzindo

assim o tempo na construção desta SAR a priori. Os resultados mostraram que construir a SAR a priori, mesmo para poucos pontos de discretização, apresentam resultados equivalentes ao resolver o problema construindo-se a SAR "a posteriori", ou seja, através de resolução do subproblema da SAR para cada período, série e abertura, durante o processo de convergência da PDDE. Com a SAR a priori foi possível reduzir o tempo computacional em média 28% em relação aos casos que constroem SAR durante o processo de convergência.

8.1 Desenvolvimentos Futuros

A nova metodologia para penalização da SAR apresentou bons resultados, porém seria interessante investir em uma metodologia onde fosse possível controlar o nível de atendimento às restrições da SAR. Isto poderia ser obtido por exemplo com a consideração de restrições probabilísticas, onde seja possível atender às restrições da SAR com um determinado nível de probabilidade.

Os resultados aqui obtidos para a metodologia da SAR a priori considera casos não condicionados, ou seja, as restrições da SAR não levam em consideração as afluições passadas, que conhecidamente impactam a distribuição de probabilidades das afluições futuras. Portanto, a nova forma de penalização e a construção da SAR a priori podem ser estendida também para o uso da SAR condicionada.

Finalmente, neste trabalho foi utilizado processamento paralelo para construção da SAR a priori, um possível trabalho futuro é a implementação de novas técnicas de processamento paralelo que considere uma metodologia mista, ou seja, com SAR a priori e posteriori (construção de restrições durante o processo de convergência da PDDE), modificando o processo da PDDE permitindo uma redução ainda maior o tempo computacional.

9. Referências

- [1] L. A. M. Fortunato, T. A. A. Neto, J. C. R. Albuquerque, M. V. F. Pereira, “Introdução ao planejamento da expansão e operação de sistemas de produção de energia elétrica”, Niterói: Universidade Federal Fluminense, EDUFF, 1990.
- [2] S. Stage, Y. Larsson, “Incremental cost of water power”, AIEE Transactions, pt III (Power Apparatus and Systems), v. 80, pp. 361-365, Aug. 1961.
- [3] J. D. Little, “The use of storage water in a hydroelectric system”, Operations Research, v.03, n.02, pp. 0187-0197, 1955.
- [4] N. V. Arvantidis, J. Rosing, “Composite representation of multireservoir hydroelectric power system”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 89, n. 2, pp. 319-326, Feb. 1970.
- [5] R. N. Brudenell, J.H. Gilbreath, “Economic complementary operation of hydro storage and steam power in the integrated TVA system”, AIEE Transactions, pt III (Power Apparatus and Systems), v.78, pp. 136-156, June 1959.
- [6] http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/CNPE/resolucao_2013/Resolucao_CNPE_3_2013.pdf
- [7] A. Shapiro, “Analysis of stochastic dual dynamic programming method”, European Journal of Operations Research, v. 209, n.1, pp. 63-72, 2010
- [8] PSR, Apresentação “Possíveis Aperfeiçoamentos da Curva de Aversão a Risco” no ONS em 19 de março de 2008, Rio de Janeiro, 2008.
- [9] 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 Proceedings, Glasgow (2008).
- [10] http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139101/5_-_Relatxrio_CPAMP_CNPE_3__2013.pdf/5eda2543-5d18-4b0c-8e87-42dcca6a8ee7
- [11] Silva, E.L. da, “Formação de Preço em Mercados de Energia Elétrica”, Editora Sagra Luzzatto, 2001
- [12] M. I. Ennes, D.D.J. Penna, M. E. P. Maceira, A. L. Diniz, C. L. V. Vasconcellos, “Representação de subsistemas e submercados de forma diferenciada no planejamento da operação hidrotérmica. XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013, Brasília.

- [13] CEPEL, Apresentação “Análise de Proposta e Discussão de Alternativas para Implementação da SAR no NEWAVE” para o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE em 05 de maio de 2008, Brasília, 2008.
- [14] 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.
- [15] A. Shapiro , W. Tekaya , JP Costa , MP Soares , "Risk neutral and risk averse stochastic dual dynamic programming method", Eur. J. of Operational Research, v. 224 , n.2 , pp. 375-391, 2013.
- [16] A.J. Askew, “Optimum reservoir operation policies and the imposition of a reliability constraint”, Water Resources Research, v.10, n.1, pp. 51-56, 1974.
- [17] <http://www4.planalto.gov.br/legislacao/search?SearchableText=Resolu%C3%A7%C3%A3o+n%C2%BA+2+de+16+de+janeiro+de+2002>.
- [18] Suanno, C. M., “Operação Estocástica de Sistemas Hidrotérmicos com Representação da Produtividade Variável”, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Dezembro 1995
- [19] A.L. Diniz, M.E.P. Maceira, C.L. Vasconcellos, D.D.J. Penna, "Superfície de Aversão a Risco para o Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos", XIII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Foz do Iguaçu, Maio 2014.
- [20] T.A. Araripe Neto, M.V.F. Pereira, J. Kelman, “A risk-constrained stochastic dynamic programming approach to the operation planning of hydrothermal systems”, IEEE Trans. Power Appar. Systems, v.104, n.2, pp. 273-279 , Jun 1985.
- [21] V. Guigues. C.A. Sagastizabal, “A robust approach to handle risk constraints in mid and long-term energy-planning of hydro-thermal systems”, EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, June 2008.
- [22] A. B. Philpott, V. L. Matos, “Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion”, Eur. J. of Operational Research, v. 218, pp. 470-483, 2012.
- [23] A. Shapiro, W. Tekaya, “Report for technical cooperation between Georgia Institute of Technology and ONS – Operador Nacional do Sistema”, Technical Report, Georgia Institute of Technology, May 2011.
- [24] L. C. Costa Jr. , M. V. Pereira , S. Granville, N. Campodónico, M. H. C. Fampa , “Planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos com aversão a risco: uma abordagem para controlar o risco de deficit e limitar a energia não suprida”, XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013, Brasília.

- [25] L.A. Terry, M.E.P. Maceira, C.V. Mercio, V.S. Duarte, "Equivalent reservoir model for hydraulic coupled systems", IX SEPOPE —Symposium of Simposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Rio de Janeiro, Brasil, May. 2004.
- [26] V.L. de Matos, E.C. Finardi, E.L. da Silva, "Comparison between the energy equivalent reservoir per subsystem and per cascade in the long-term operational planning in Brazil", Engineering and Optimization Conferencer, Rio de Janeiro, Brazil, Jun. 2008.
- [27] MACEIRA, M.E.P., BEZERRA, C.V., 1997, Stochastic Streamflow model for Hydroelectric Systems In: Proceedings of 5th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 305-310, Vancouver, Canada, Sep.
- [28] D. D. J. Penna, M. E. P. Maceira, J.M. Damázio, "Selective sampling applied to long-term hydrothermal generation planning", *17th PSCC - Power Syst. Comp. Conf.*, Stockholm, Sweden, Aug. 2011.
- [29] 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.
- [30] 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", *Proceedings of the Power System Computation Conference - PSCC'02*, Sevilla, Spain, June 2002.
- [31] Tcheou M. P., Cabral R.N., Penna D.D.J., Duarte V.S., Maceira M.E.P., "Modelagem da função de perdas a fio d'água através do MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines)", XII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Rio de Janeiro, Maio 2012.
- [32] J.R. Birge, "Decomposition and partitioning methods for multistage stochastic linear programs", *Operations Research*, v.33, n.5, pp. 989-1007, 1985.
- [33] Diniz, A.L., Maceira, M.E.P., "Multi-lag Benders decomposition for power generation planning with nonanticipativity constraints on the dispatch of LNG thermal plants", In: Horand I Gassmann, William T Ziemba. (Org.). *Stochastic Programming - Applications in Finance, Energy, Planning and Logistics*. 1ed.: World Scientific, 2013, v. 4, p. 399-420.
- [34] Pinto R. J., "Aplicação de processamento paralelo ao problema de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos baseado em cluster de computadores", Rio de Janeiro, Brasil: Tese de Doutorado, DEE, Coppe – UFRJ – Rio de Janeiro, 2011.