

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

Relatório Técnico



Nº/Ano: 37714/2013 **Nº de Páginas:** 27 **Nº de Anexos:** -

Título: Notas técnicas referentes ao projeto NEWAVE emitidas em 2012 e 2013.

Departamento: Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

Área de Responsabilidade: B200 **Conta de Apropriação:** 1345

Cliente: Centrais Elétricas Brasileiras S/A – Eletrobras
Av. Presidente Vargas, 409 – 12º andar
20071-003 – Rio de Janeiro / RJ
Atenção:
Dr. Egídio Schoenberger

Equipe de Acompanhamento:
Lilian Laubenbacher Sampaio – Eletrobras
Flávio Corga Cardinot - Eletrobras
Fabiano Salomão de Oliveira - Eletrobras

Resumo: Este relatório apresenta as notas técnicas que descrevem os desenvolvimentos metodológicos do programa NEWAVE realizados durante os anos de 2012 e 2013.

Autores:
Maria Elvira Piñeiro Maceira – Cepel
André Luiz Diniz Souto Lima – Cepel
Débora Dias Jardim Penna – Cepel
César Luiz Vilasbôa de Vasconcellos – PUC/RJ

Palavras-Chave:
planejamento da operação de médio prazo,
sistemas hidrotérmicos interligados,
programação dinâmica dual estocástica

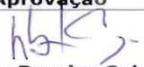
Classificação: CONTROLADO

Gerente de Projeto

Nome: Maria Elvira Piñeiro Maceira
Tel.: (21)2598-6454 **Fax:** (21)2598-6482
E-mail: elvira@cepel.br

Chefe do Departamento

Nome: Maria Elvira Piñeiro Maceira
Tel.: (21)2598-6454 **Fax:** (21)2598-6482
E-mail: elvira@cepel.br

Aprovação

Roberto Pereira Caldas
Diretor de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação
12 / 03 / 13

PROJETO NEWAVE

MODELO ESTRATÉGICO DE GERAÇÃO HIDROTÉRMICA A SUBSISTEMAS EQUIVALENTES

Notas técnicas referentes ao projeto NEWAVE emitidas em 2012 e 2013

newave@cepel.br

ÍNDICE

1. NOTA TÉCNICA Nº 64 (REVISÃO 1) - APRIMORAMENTOS NO CÁLCULO DA ENERGIA DE SUBMOTORIZAÇÃO NO MODELO NEWAVE (OUTUBRO 2012)	1
1.1 Introdução	1
1.2 Sazonalização considerando a ENA do subsistema	2
1.3 Sazonalização considerando a ENA da usina submotorizada	4
1.4 Sazonalização considerando a ENA da usina submotorizada e a regularização à montante da usina	7
1.5 Entrada de Dados	8
1.6 Referências	9
2. NOTA TÉCNICA Nº 65 - MECANISMOS ALTERNATIVOS DE AVERSÃO A RISCO - SUPERFÍCIE DE AVERSÃO A RISCO (MAIO 2013)	10
2.1 Introdução	10
2.2 Mecanismos Alternativos de Aversão a Risco (MAR)	12
2.2.1 Superfície de Aversão a Risco (SAR)	12
2.3 Entrada de Dados	16
2.4 Referências	17
3. NOTA TÉCNICA Nº 66 - MECANISMOS ALTERNATIVOS DE AVERSÃO A RISCO - VALOR CONDICIONADO A UM DADO RISCO (MAIO 2013)	18
3.1 Introdução	18
3.2 Mecanismos Alternativos de Aversão a Risco (MAR)	20
3.2.1 Valor Condicionado a um Dado Risco (CVaR)	20
3.3 Entrada de Dados	23
3.4 Referências	24

1. NOTA TÉCNICA nº 64 (revisão 1) - Aprimoramentos no cálculo da energia de submotorização no modelo NEWAVE (Outubro 2012)

1.1 Introdução

Esta Nota Técnica tem como objetivo descrever o cálculo da energia de submotorização utilizada no modelo NEWAVE, assim como os aprimoramentos que foram incorporados ao processo de cálculo desta grandeza, a fim aperfeiçoar a representação do sistema equivalente de energia.

No início do horizonte de estudo do programa NEWAVE, as usinas hidroelétricas que fazem parte da configuração devem estar em um dos estados descritos a seguir:

1. **Existente:** a usina já completou a fase de enchimento do volume morto e o cronograma de expansão está completamente concluído. A potência instalada da usina corresponde ao valor constante no seu projeto.
2. **Em expansão:** a usina já completou a fase de enchimento do volume morto, porém o cronograma de expansão ainda não foi concluído. A usina pode já ter atingido sua potência de base¹ ou não.
3. **Não existente:** a usina começará a encher o volume morto em algum período durante o horizonte de planejamento. Após o enchimento do volume morto, terá início o cronograma de motorização a partir da entrada da primeira máquina, passando pela potência de base até atingir a motorização completa, que corresponde ao valor constante no projeto da usina.

Toda usina que já tenha iniciado seu cronograma de motorização, mas que não tenha atingido a potência de base é considerada como uma usina submotorizada. Segundo o manual de referência do modelo NEWAVE [1],

“A energia das usinas submotorizadas, corresponde a energia disponível em cada uma das novas usinas de reservatório², durante o período de motorização e até que seja instalada sua potência base. Deve ser fornecida como um recurso externo à configuração e este valor corresponde a 90% da capacidade até então instalada. Isto é feito porque a inclusão da nova usina na configuração acarretaria um erro no cálculo da energia armazenada, uma vez que os volumes armazenados nos reservatórios a montante passariam a ser valorizados nesta usina. Como sempre haverá afluições suficientes à operação a plena carga, não há maiores inconvenientes no tratamento em separado descrito acima.

¹ Potência necessária para que a usina atenda a sua garantia física.

² Nota da NT: a submotorização é considerada tanto para usinas com reservatório quanto para usinas a fio d'água

Se o reservatório deve ser operado para regularizar usinas à jusante, a usina de reservatório submotorizada deve ser incluída na configuração com rendimento igual a zero.”

O cálculo da energia de submotorização é dado pela equação (1), e este montante é abatido diretamente do mercado de energia.

$$ESMT_{isis,iper} = 0,9 \sum_{iusi=1}^{NSUBM} PINST_{iusi,iper} \quad (1)$$

onde:

$ESMT_{isis,iper}$ é a energia de submotorização do sistema *isis* no período *iper* (MWhês)

$PINST_{iusi,iper}$ é a energia correspondente à potência instalada da usina *iusi* no período *iper* (MWhês)

$NSUBM$ é o número de usinas submotorizadas do sistema *isis*

Ressalta-se que durante os períodos de pré e pós estudo a energia de submotorização não é considerada.

Enquanto uma usina não atinge sua potência base, sua produtividade é considerada nula para efeito de cálculo das variáveis do subsistema equivalente de energia, exceto para o cálculo da perda energética devido ao enchimento de volume morto.

Em configurações mais recentes, observa-se que há usinas localizadas em bacias que apresentam uma grande variação no regime hidrológico entre os períodos úmido e seco. Nestas situações, a energia de submotorização destas usinas pode ficar superestimada em alguns períodos, uma vez que a premissa inicial de que sempre haverá afluência suficiente para atender a sua operação a plena carga pode não ser válida.

Uma forma de minimizar o efeito da superestimação da energia de submotorização é considerá-la em função da sazonalidade do regime hidrológico. Nesta Nota Técnica são apresentadas duas alternativas de sazonalização considerando a energia natural afluyente média histórica. Na primeira alternativa é considerada a energia natural afluyente (ENA) ao subsistema, enquanto na segunda alternativa, a energia natural afluyente à usina submotorizada. A primeira alternativa foi implementada na versão 14.6 e a segunda será implementada com base na versão 16.13.2 gerando uma nova versão.

1.2 Sazonalização considerando a ENA do subsistema

Nos estudos de planejamento da expansão energética, a usina de Belo Monte compõe um único subsistema, chamado de Belo Monte. Esta usina será construída no rio Xingu, terá capacidade instalada de 11.233 MW e energia firme de 4.571 MW [2]. Com relação ao regime hidrológico, observam-se grandes variações de vazão natural afluyente entre os períodos úmido e seco como ilustrado na Figura 1. É possível observar que a vazão média mensal do histórico da usina de Belo Monte, em abril, é aproximadamente 18 vezes maior do que a vazão média mensal observada em setembro.

Na Figura 1 é apresentada a evolução temporal da energia de submotorização da usina de Belo Monte, obtida pela equação (1), considerando o cronograma de obras do PDE 2020 e número de base³ igual a 8. Note que a usina completa sua motorização em mar/2017. É apresentada também a evolução temporal da energia natural afluyente desta usina associada à vazão afluyente média histórica (MLT), Figura 2, e à sua produtibilidade. Pode-se verificar que durante o período seco do ano de 2016 a capacidade instalada da usina de Belo Monte é superior à sua ENA média histórica, o que resulta em uma superestimação da energia de submotorização para o subsistema de Belo Monte.

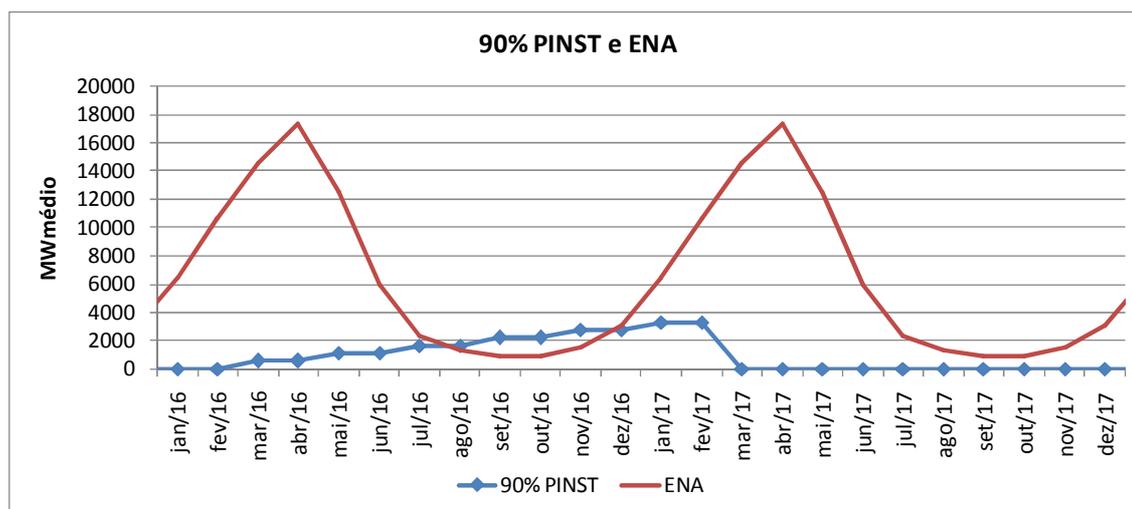


Figura 1 – Submotorização e ENA de Belo Monte (jan/2016 a dez/2017).

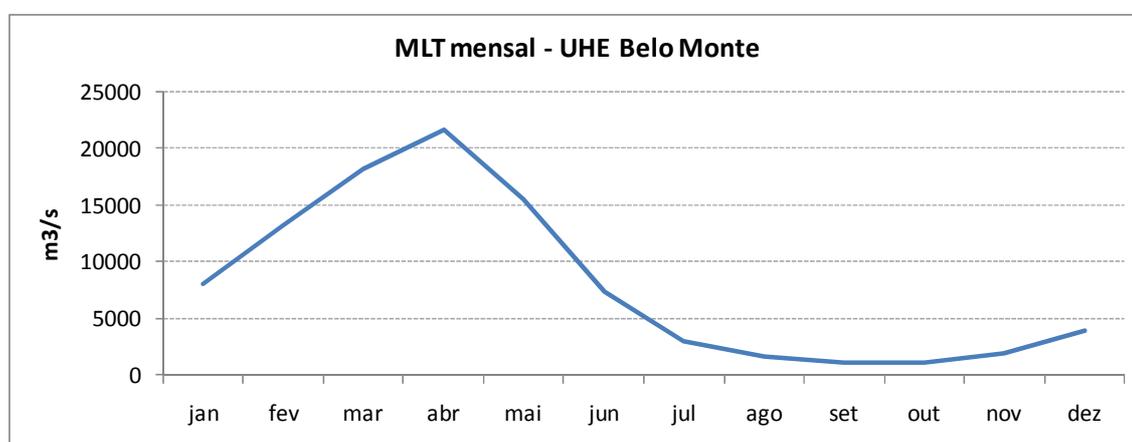


Figura 2 – Vazão natural afluyente média mensal do histórico da UHE Belo Monte.

A abordagem de sazonalização considerando a ENA do subsistema consiste em se atribuir à energia de submotorização o valor mínimo entre a energia de submotorização calculada conforme a equação (1) e a ENA média histórica do subsistema, considerando as usinas que atingiram suas potências de base bem como as usinas submotorizadas⁴. A cada período, a energia de submotorização de um subsistema é dada pela equação (2).

³ Número de máquinas necessário para atingir a potência de base.

⁴ Usinas submotorizadas não são consideradas no cálculo da energia natural afluyente.

$$ESMT_{isis,iper} = \text{MIN} \left(\left[0,9 \cdot \sum_{iusi=1}^{NSUBM} PINST_{iusi,iper} \right], \left[\overline{ENABH}_{isis,iper} + \sum_{iusi=1}^{NSUBM} \overline{ENAH}_{iusi,iper} \right] \right) \quad (2)$$

onde:

$\overline{ENABH}_{isis,iper}$ é a ENA bruta histórica média do subsistema *isis* (MWmês)

$\overline{ENAH}_{iusi,iper}$ é a ENA bruta histórica média da usina *iusi* (MWmês)⁵

Na Figura 3 é apresentada a evolução temporal da energia de submotorização do subsistema Belo Monte, considerando os valores obtidos com a equação (1) e com a equação (2). A modelagem da energia de submotorização sazonalizada pela ENA do subsistema resulta em maior aderência da realidade quando são considerados subsistemas a fio d’água de grande porte como, por exemplo, a UHE Belo Monte.

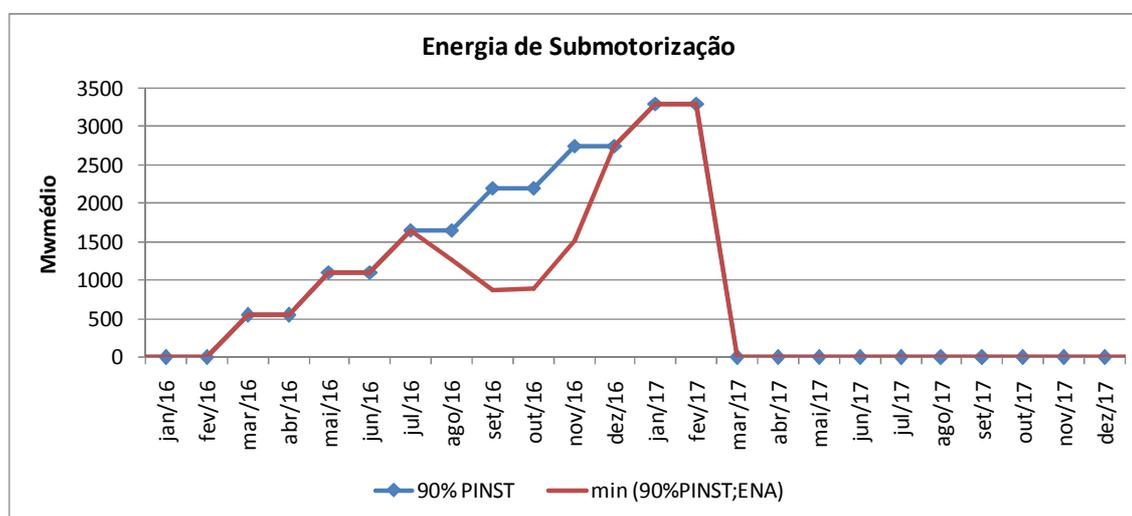


Figura 3 - Energia de submotorização do subsistema Belo Monte (jan/2016 a dez/2017).

Com o intuito de aperfeiçoar a representação do sistema equivalente de energia, foi introduzido na versão 14.6 do programa NEWAVE o aprimoramento descrito acima.

1.3 Sazonalização considerando a ENA da usina submotorizada

A opção descrita no item 2 se mostrou bastante adequada para representação de usinas submotorizadas com grande capacidade instalada, localizadas em bacias hidrográficas com grande variação nas afluições durante a transição entre o período úmido e o período seco, quando essas estão alocadas em subsistemas dedicados⁶. Porém, a consideração da sazonalidade da energia natural afluyente ao subsistema não é eficaz quando as usinas submotorizadas estão alocadas em um subsistema que contém diversas usinas existentes.

⁵ $\overline{ENAH}_{iusi,iper}$ é igual a vazão natural afluyente (total) média do histórico relativa ao mês associado ao período *iper* vezes a produtividade associada a altura correspondente a 65% do volume útil da usina *iusi*. Se a usina for fio d’água, considerar a produtividade associada a altura líquida.

⁶ Subsistemas que contêm, em geral, apenas as usinas submotorizadas em questão.

Seja o caso da usina de Santo Antônio, representada no subsistema Sudeste, conforme o programa mensal de operação de dezembro de 2011. Esta usina tem capacidade instalada de 3.150 MW dividida em 44 máquinas, e sua garantia física é de 2.218 MW médios [3]. Na Figura 4 é ilustrada a grande variação de vazão natural afluente média histórica entre o período úmido e período seco. Esta variação chega a 600% entre os meses de março e setembro.

Analisando a energia natural afluente à usina Santo Antônio, correspondente à vazão histórica, são encontrados alguns períodos em que o montante de ENA é inferior a sua capacidade instalada. Desta forma, caso a usina não tenha atingido sua potência base, nestes períodos sua parcela de energia submotorizada deveria ser limitada ao valor de sua energia natural afluente.



Figura 4 – Vazão natural afluente média mensal do histórico da UHE Santo Antônio.

No entanto, a informação de energia natural afluente, que é utilizada para efeito de limitação da energia de submotorização na equação (2), considera o montante total afluente ao subsistema. Dadas as características do subsistema Sudeste, a ENA deste subsistema dificilmente será menor do que a capacidade instalada das usinas submotorizadas, tornando o resultado obtido pela equação (2) igual ao obtido pela equação (1). Este comportamento pode ser verificado na Figura 5.

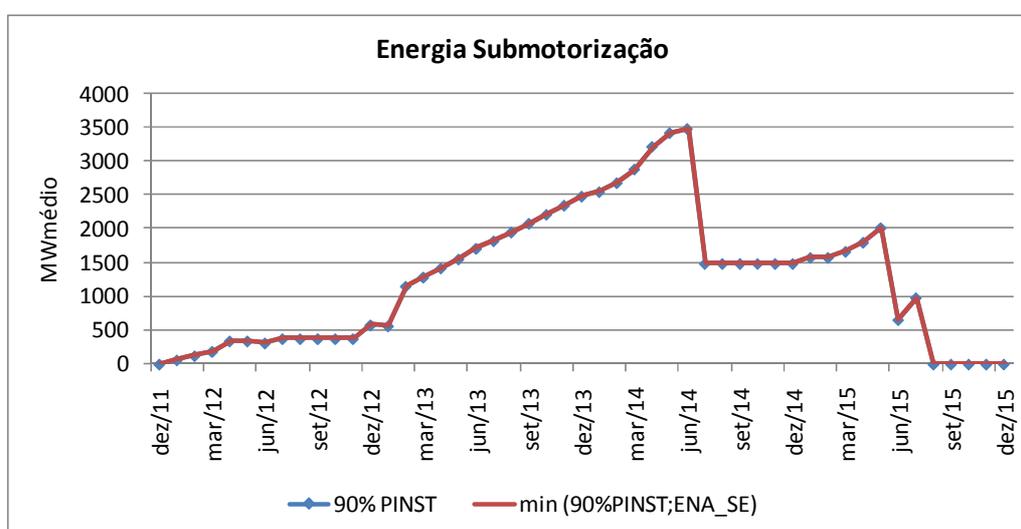


Figura 5 – Energia de submotorização do subsistema Sudeste.

A abordagem de cálculo da energia de submotorização descrita neste item consiste em considerar a sazonalidade da energia natural afluyente apenas das usinas submotorizadas. A parcela relativa à energia de submotorização de uma usina é calculada como sendo o mínimo entre 90% da sua capacidade instalada e da sua energia natural afluyente histórica média. A energia de submotorização do subsistema é dada pelo somatório das parcelas de energia de submotorização de todas as usinas submotorizadas pertencentes a este subsistema, de acordo com a equação (3).

$$ESMT_{\text{isis,iper}} = \sum_{\text{iusi}=1}^{\text{NSUBM}} \text{MIN}(0,9\text{PINST}_{\text{iusi,iper}}, \overline{ENAH}_{\text{iusi,iper}}) \tag{3}$$

Na Figura 6 pode-se observar o comportamento da parcela de energia de submotorização referente à usina de Santo Antônio representada no subsistema Sudeste, ao longo do tempo considerando as três opções de modelagem da energia de submotorização, descritas pelas equações (1) a (3). As curvas relativas a “90% PINST” (equação 1) e “min(90% PINST;ENA SE)” (equação 2) estão sobrepostas.

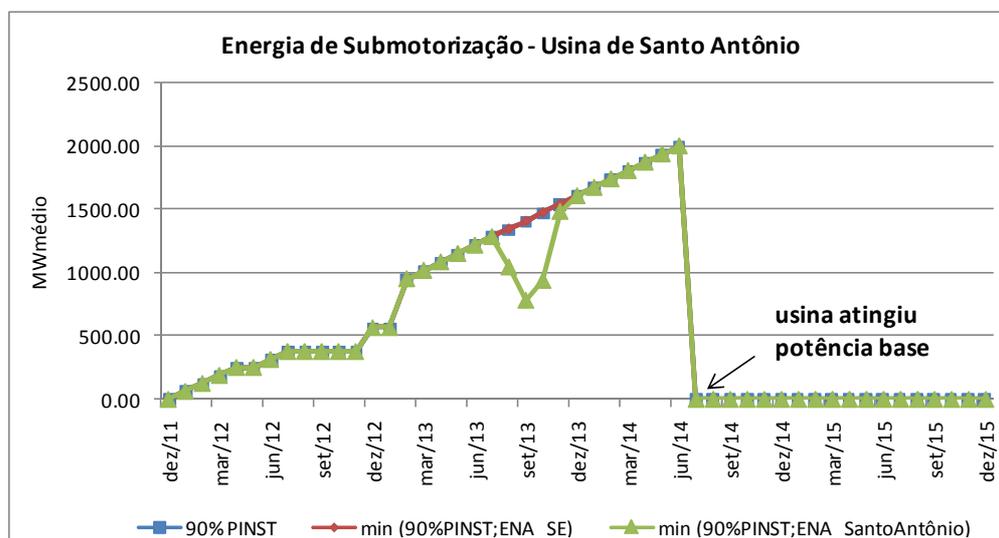


Figura 6 – Parcela da energia de submotorização da UHE Santo Antônio

A evolução temporal da energia de submotorização do subsistema Sudeste é apresentada na Figura 7. Pode-se verificar que, para configuração analisada e para os períodos secos dos anos de 2013 a 2015, a energia de submotorização estava superestimada quando se considerava somente a potência instalada e a energia natural afluyente do subsistema.

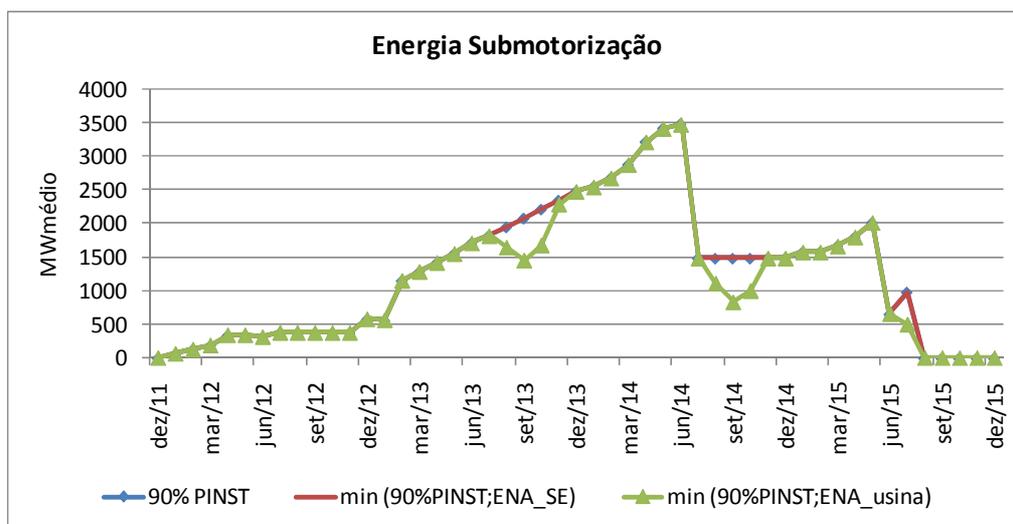


Figura 7 - Energia de submotorização do subsistema Sudeste

De acordo como a equação (3), se uma dada usina submotorizada não tiver disponível energia natural afluyente própria suficiente para atender à sua capacidade instalada (90%PINST), então a parcela da energia de submotorização referente a esta usina será limitada ao montante da ENA própria.

Porém, um aspecto importante que deve ser levado em conta é a possibilidade das usinas a montante contribuírem para o atendimento desta capacidade instalada, através do desestoque de energia armazenada em seus reservatórios, o que motivou uma nova alternativa para representar a energia de submotorização, descrita a seguir.

1.4 Sazonalização considerando a ENA da usina submotorizada e a regularização à montante da usina

Nesta nova alternativa, deve ser realizada uma análise da cascata onde se encontra a usina submotorizada a fim de calcular uma grandeza chamada EARMX', que está relacionada à regularização das usinas a montante. Essa grandeza é calculada considerando o somatório de 65% volume útil de todas as usinas a montante da usina submotorizada valorizada pela sua produtividade, de acordo com a equação (4). EARMX' é dada por usina e por período, mas para simplificar a notação esses índices foram omitidos.

$$EARMX' = c \sum_{j \in M_i} 0.65 V_{util,j} \rho_i \tag{4}$$

onde:

c é uma constante que depende do sistema de unidades considerado

M_i é o conjunto de reservatórios a montante da usina submotorizada i, inclusive.

V_{util,j} é o volume útil da usina j que pertence ao conjunto M_i

ρ_i é a produtividade equivalente da usina i

Se EARMX' for superior a 90% da potência instalada da usina submotorizada, então as usinas a montante são capazes de suprir essa energia. Portanto, a energia de submotorização será igual a esse valor. Por outro lado se EARMX' for inferior a 90% da potência instalada, foi proposto inicialmente o uso da equação (3). Desta forma, a energia de submotorização do subsistema *isis* no período *iper* seria dada pela equação (5).

$$ESMT_{\text{isis,iper}} = \sum_{\text{iusi}=1}^{\text{NSUBM}} \begin{cases} 0,9PINST_{\text{iusi,iper}} & \text{se } EARMX' \geq 0,9PINST_{\text{iusi,iper}} \\ \text{MIN}(0,9PINST_{\text{iusi,iper}}, \overline{ENAH}_{\text{iusi,iper}}) & \text{se } EARMX' < 0,9PINST_{\text{iusi,iper}} \end{cases} \quad (5)$$

Porém, a fim de tornar suave a variação do valor da energia de submotorização quando EARMX' assumir valores em torno de 90% da capacidade instalada, a equação (5) foi ligeiramente modificada, resultando na equação (6). Desta forma, a energia de submotorização será igual ao valor de EARMX' nos casos em que esse for inferior a 90% da capacidade instalada, porém superior à ENA média histórica da usina.

$$ESMT_{\text{isis,iper}} = \sum_{\text{iusi}=1}^{\text{NSUBM}} \begin{cases} 0,9PINST_{\text{iusi,iper}} & \text{se } EARMX' \geq 0,9PINST_{\text{iusi,iper}} \\ \text{MIN}\left(0,9PINST_{\text{iusi,iper}}, \text{MAX}(EARMX', \overline{ENAH}_{\text{iusi,iper}})\right) & \text{se } EARMX' < 0,9PINST_{\text{iusi,iper}} \end{cases} \quad (6)$$

Para ilustrar o uso das equações (5) e (6), na Figura 8 é apresentada a energia de submotorização de uma dada usina com relação à variação da grandeza EARMX'. É possível observar uma transição suave do valor de ESMT, quando EARMX' passa de um valor superior a 90% da capacidade instalada para um valor ligeiramente inferior, no caso onde ESMT é calculada a partir da equação (6).

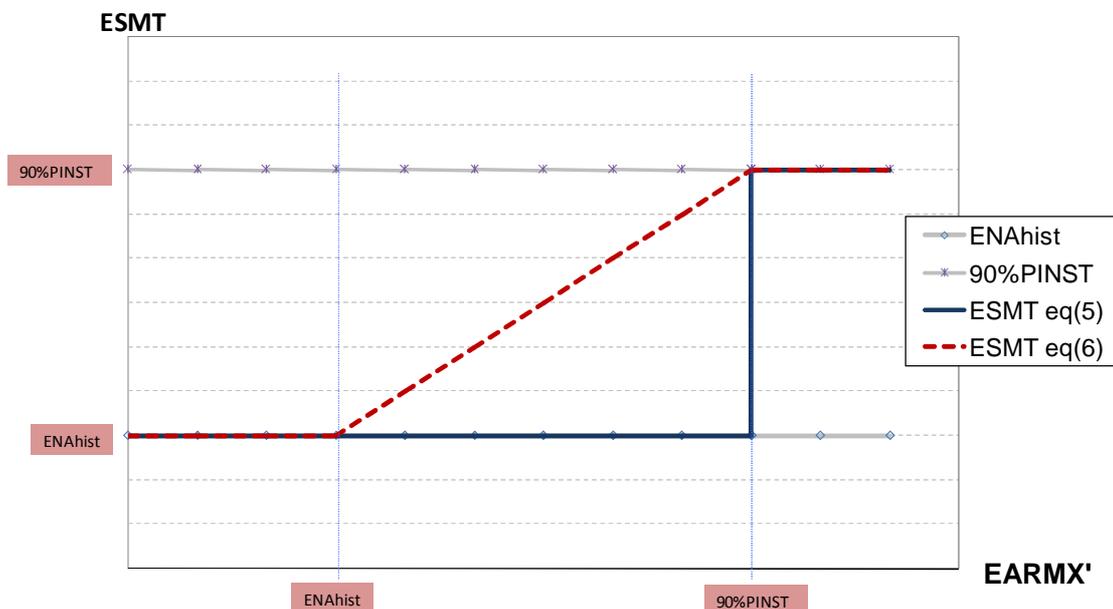


Figura 8 – Variação de ESMT em função de EARMX'

1.5 Entrada de Dados

No registro 48, campo 1, do arquivo de dados gerais (dger.dat), o flag para a consideração da representação da energia de submotorização de cada subsistema foi alterado de forma a considerar as três possíveis alternativas de cálculo, a saber: função da capacidade instalada das usinas submotorizadas

(alternativa 0), função das energias afluentes médias históricas do subsistema (alternativa 1) ou função das energias afluentes médias históricas de cada usina submotorizada (alternativa 2).

1.6 Referências

- [1] CEPEL, “Manual de Referência – Modelo Newave”, Relatório Técnico, Rio de Janeiro, RJ.
- [2] Site Norte Energia S.A. - <http://norteenergiasa.com.br/portugues/usina-belo-monte/> (acessado em 02/12/2011)
- [3] Site ANEEL - <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/energiaassegurada.asp> - (acessado em 20/08/2012)

2. NOTA TÉCNICA nº 65 - Mecanismos Alternativos de Aversão a Risco - Superfície de Aversão a Risco (Maio 2013)

2.1 Introdução

Com o advento do racionamento de energia elétrica entre 2000 e 2001, o Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico, em seu Relatório de Progresso N^o 2, (Jan/2002), Tema 21 - Procedimentos de alerta quanto a dificuldades de suprimento, Documento de Apoio C: “Aversão a Risco - Proposta Metodológica” [1], propôs uma metodologia para a consideração da aversão a risco no cálculo da política ótima de operação do sistema de geração brasileiro.

Nesta metodologia, é definida uma curva de volume mínimo operativo para cada subsistema e também uma penalidade que é aplicada à diferença entre o volume mínimo operativo e a energia armazenada em um subsistema no final de cada mês (estágio), quando esta for inferior ao volume mínimo operativo. Este fator de penalização (R\$/MWh), determinado pela ANEEL, propiciaria, em princípio, o despacho de geração térmica adicional para restabelecer o volume mínimo desejado.

Esta metodologia, aqui denominada de “penalidade original”, foi implementada no Programa NEWAVE e disponibilizada ao ONS para testes em Junho de 2002 [2]. Após os testes realizados, concluiu-se que, embora matematicamente consistente, poderia provocar, em diversas situações, uma elevação acentuada nos custos marginais de operação dos subsistemas.

Posteriormente, foi desenvolvida, pelo ONS e seus consultores, uma alternativa metodológica, denominada “penalidade criativa”, que é ajustável ao longo das iterações da programação dinâmica dual estocástica, a fim de diminuir o efeito cumulativo nos custos marginais de operação, mencionado anteriormente. Este procedimento é atualmente empregado no modelo NEWAVE para a realização dos PMOs. Entretanto, devido a dificuldades técnicas [3], o mesmo não pode ser estendido para o modelo DECOMP.

A aplicação da CAR com “penalidade criativa” tem sido utilizada no modelo NEWAVE desde 2004. Entretanto, com o passar do tempo, a mesma tem se mostrado incapaz de fornecer uma sinalização adequada o suficiente para indicar um despacho térmico mais seguro no modelo DECOMP e, conseqüentemente, um maior valor de PLD.

Com o objetivo de garantir maior segurança no abastecimento e minimizar os riscos de racionamento, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), por meio da Resolução nº 8/2007 [4] estabeleceu que, extraordinariamente, com vistas à garantia do suprimento energético, o ONS poderia despachar recursos energéticos fora da ordem do mérito econômico ou mudar o sentido do intercâmbio entre submercados, por decisão do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE. Determinou também que o despacho de recursos para recuperar o nível de segurança (CAR) do estoque não seria computado na formação do PLD.

Posteriormente, a Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP), por meio do Grupo de Trabalho “Revisão da Metodologia do POCP/Nível Meta” [5] aprovou uma sistemática para a determinação do acionamento extraordinário de usinas térmicas por razão de segurança energética, chamados de Procedimentos Operativos de Curto Prazo - POCP, os quais são baseados na definição de níveis meta para o mês de novembro de cada ano, nas regiões SE/CO e NE.

O acoplamento temporal das decisões em um sistema hidrotérmico com predominância hidroelétrica, como o SIN, faz com que uma decisão tomada em determinado momento tenha impactos sobre o futuro. Assim, a elevação no nível do armazenamento decorrente da geração termelétrica adicional, por segurança energética, tem efeitos sobre a formação dos preços não só no estágio de tempo atual, como nos estágios temporais subseqüentes.

No entanto, a utilização destes mecanismos complementares de acionamento de usinas térmicas influencia o nível de armazenamento dos reservatórios e pode provocar uma redução artificial no PLD nos estágios seguintes.

A Figura 1.5 ilustra o efeito do despacho por segurança energética sobre os PLDs dos estágios seguintes.

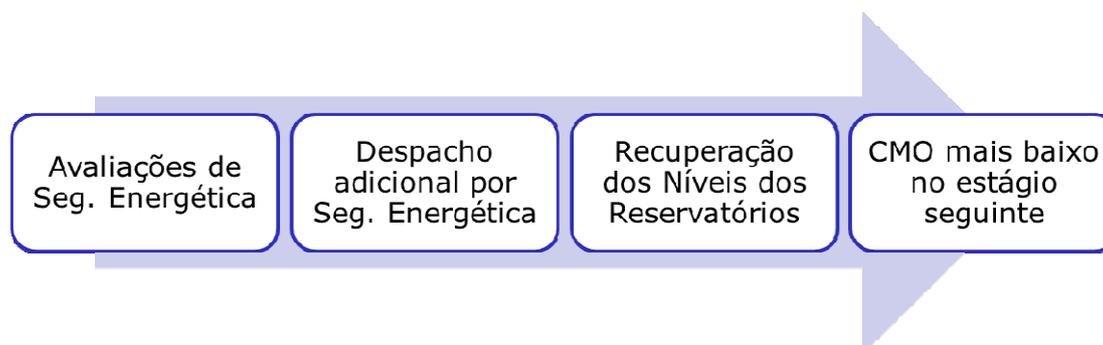


Figura 1.1 – Efeito do despacho por segurança energética sobre os PLDs dos estágios seguintes

Dessa forma, observa-se um ciclo em que o despacho por segurança reduz os preços dos estágios seguintes, podendo provocar distorções no atual modelo de precificação.

Assim, é importante 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. Neste sentido, o Cepel vem pesquisando e desenvolvendo este assunto há alguns anos.

Com este objetivo, o CNPE editou em 6 de março do corrente ano, a Resolução nº 3/2013 [6], a qual determinou que a CPAMP desenvolva e implemente metodologia para internalização de mecanismos de aversão a risco nos programas computacionais para estudos energéticos e formação de preço, realizando os ajustes necessários nas disposições referentes ao atendimento energético, à formação de preço e aos Encargos de Serviços do Sistema.

2.2 Mecanismos Alternativos de Aversão a Risco (MAR)

Nesta Nota Técnica será descrita uma estratégia alternativa, Superfície de Aversão a Risco – SAR, para permitir a elevação da segurança do sistema, com o reflexo correspondente no valor do PLD utilizado para o mercado de curto prazo. Uma metodologia com esta característica foi inicialmente apresentada em [7]. A análise desta proposta conduzida pelo CEPEL verificou a necessidade de aprimorá-la e estendê-la para viabilizar a sua aplicação, conforme apresentado em [8].

A Nota Técnica 66 do Projeto NEWAVE descreve o Mecanismo Alternativo de Aversão a Risco, Valor Condicionado a um Dado Risco - CVaR.

2.2.1 Superfície de Aversão a Risco (SAR)

A Superfície de Aversão a Risco (SAR) é uma forma mais acurada do que a CAR de estabelecer níveis mínimos seguros para energia armazenada nos subsistemas, uma vez que:

- leva em consideração a operação interligada dos subsistemas, ao invés de utilizar níveis individuais mensais para cada subsistema;
- A sua construção pode ser internalizada, ao longo do processo de resolução do problema, nos modelos de planejamento da operação.

Em linhas gerais, a SAR é uma extensão, para o caso multivariado, das restrições de armazenamento mínimo de energia nos subsistemas, como ilustra a Figura 2.1, para um exemplo envolvendo os subsistemas Sudeste (SE) e Nordeste (NE).

Nessa figura, a variável β indica o nível de ocorrência de déficit no futuro (para uma série ou um conjunto de séries hidrológicas pré-estabelecidas) em função não apenas dos níveis individuais de energia armazenada (Earm) de cada subsistema (retas vertical e horizontal na figura à direita), mas também em função da energia total do subsistema (reta inclinada). A restrição inclinada atua no intervalo de valores de Earm para os quais o intercâmbio entre os subsistemas não está no limite, enquanto as retas vertical e horizontal representam os requisitos mínimos individuais de Earm de cada subsistema, devido ao limite no recebimento de energia por intercâmbio. Caso mais de dois subsistemas sejam considerados, a SAR poderia conter planos envolvendo um, dois ou mais subsistemas na restrição.

2.2.1.1 Incorporação no Modelo NEWAVE

Em cada estágio t , para cada estado x_t (armazenamento e afluências passadas) e cenário (abertura) s do problema de otimização resolvido pelo modelo NEWAVE, resolve-se um subproblema determinístico de otimização (“subproblema da SAR”). O objetivo é verificar se o nível meta de cada subsistema ao final de, por exemplo, novembro (período final T , fornecido pelo usuário) pode ser atingido a partir dos resultados de níveis de armazenamento do subproblema no referido estado, para uma série pré-estabelecida. A Figura 2.2 ilustra esse procedimento.

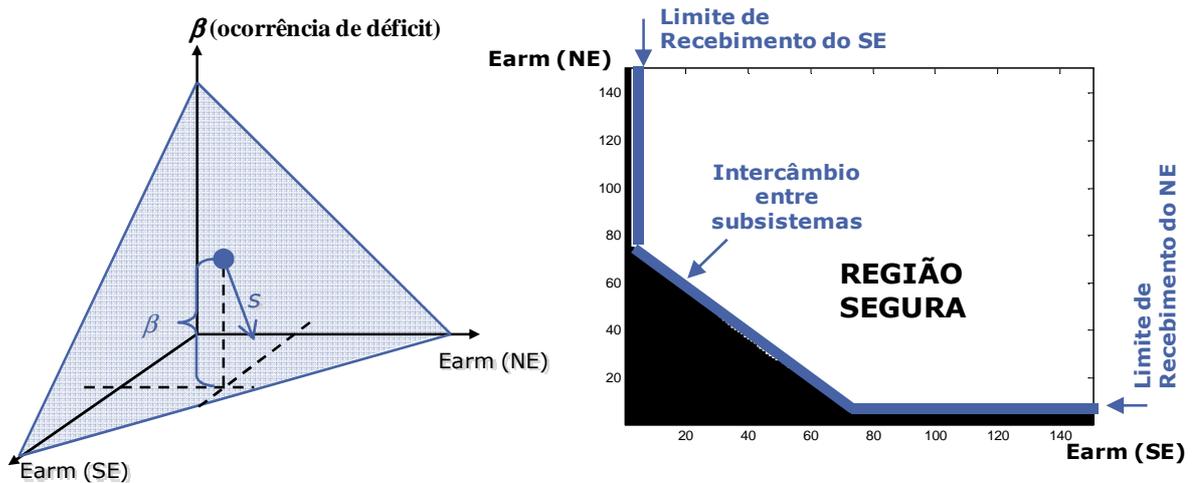


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo da região de segurança definida pela SAR

As restrições da SAR serão construídas apenas para os estados visitados que resultariam em violação do nível meta do subproblema determinístico. As restrições construídas em cada estado e cenário podem ser compartilhadas para todos os estados e cenários do mesmo estágio visitados nas próximas iterações da PDDE. O problema determinístico da SAR é resolvido em todos os estados e cenários da recursão backward e em todos os cenários da simulação forward da PDDE.

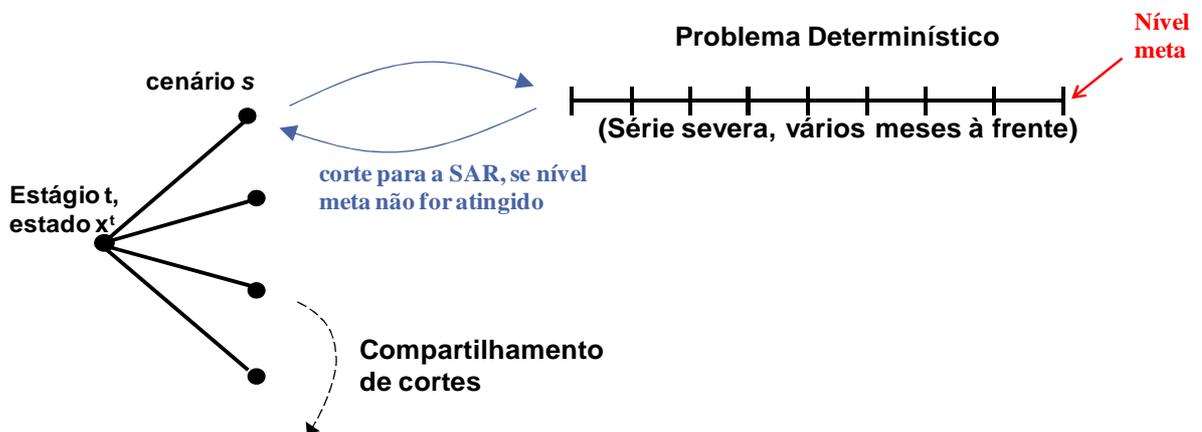


Figura 2.2 – Relação entre o subproblema do NEWAVE e o problema determinístico da SAR

Ressalta-se que pode ser necessário resolver mais de uma vez o subproblema do NEWAVE no processo de cálculo da restrição da SAR, conforme ilustra o fluxograma da Figura 2.3:

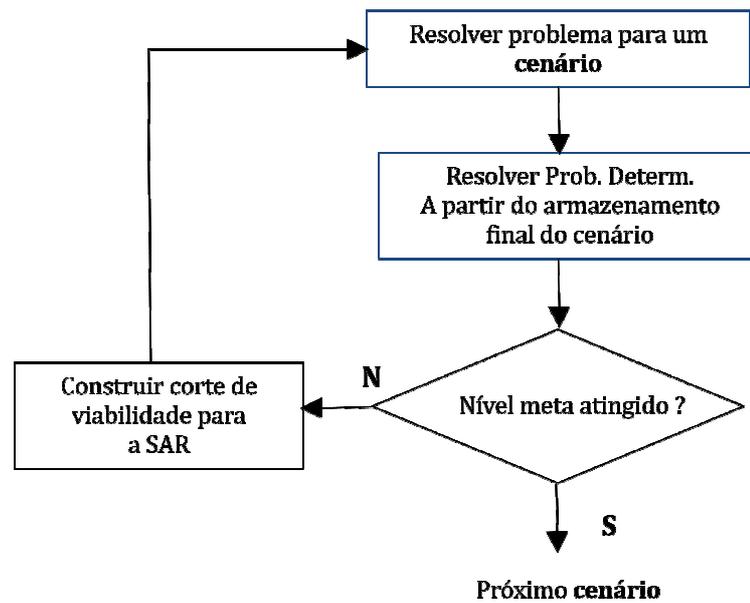


Figura 2.3 – Processo iterativo de consideração da SAR em um subproblema do NEWAVE

Apresentam-se a seguir as formulações do subproblema determinístico (que será utilizado para construir as restrições da SAR) e do subproblema do NEWAVE (que utilizará essas restrições).

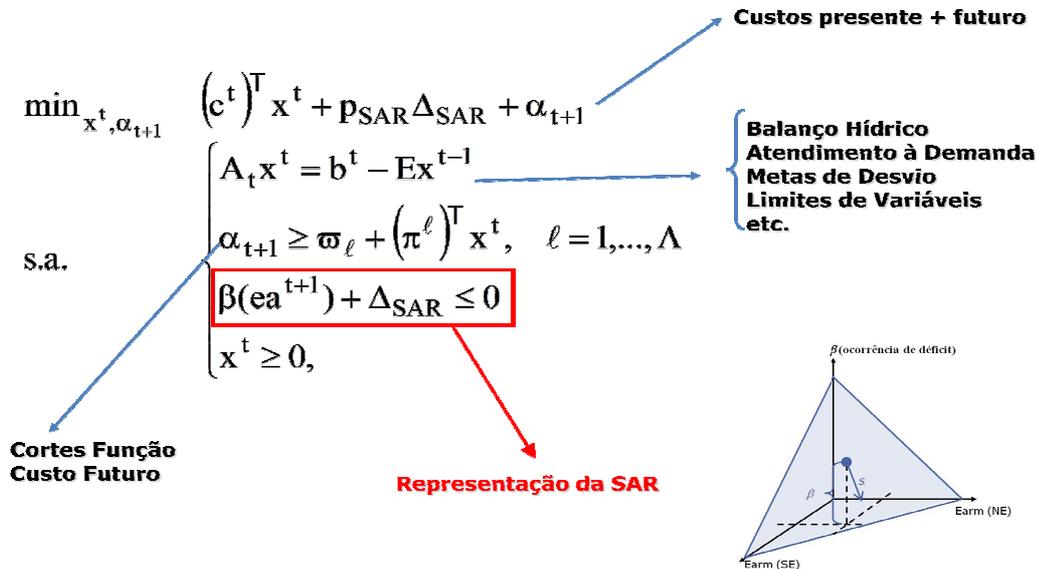
Subproblema da SAR

$$\beta(ea_i^\tau) = \min_{z, ea, gh, gt, f} \sum_{\tau=t+1}^T \sum_{i=1}^{NSIS} z_i^\tau \quad \text{Corte de carga}$$

$$\begin{aligned}
 & ea_i^{\tau+1} + gh_i^\tau = ea_i^\tau + EAF_i^\tau, & i = 1, \dots, NSIS, \\
 & \tau = t+1, \dots, T \\
 & gh_i^\tau + gt_i^\tau + \sum_{j \in \Omega_i} (f_{j,i}^\tau - f_{i,j}^\tau) + z_i^\tau = D_i^\tau, & i = 1, \dots, NSIS, \\
 & \tau = t+1, \dots, T \\
 & z^\tau, ea^\tau, gh^\tau, gt^\tau, f^\tau \geq 0, & \tau = t+1, \dots, T \\
 & gt^\tau \leq gt_{\max}^\tau, & \tau = t+1, \dots, T, \\
 & ea_i^T \geq Meta_i^T \quad \text{Nível meta}
 \end{aligned}$$

s.a.

Subproblema do NEWAVE



A Figura 2.4 ilustra o processo iterativo geral do modelo NEWAVE, com a incorporação do subprocesso iterativo de cada subproblema, para construção das restrições da SAR.

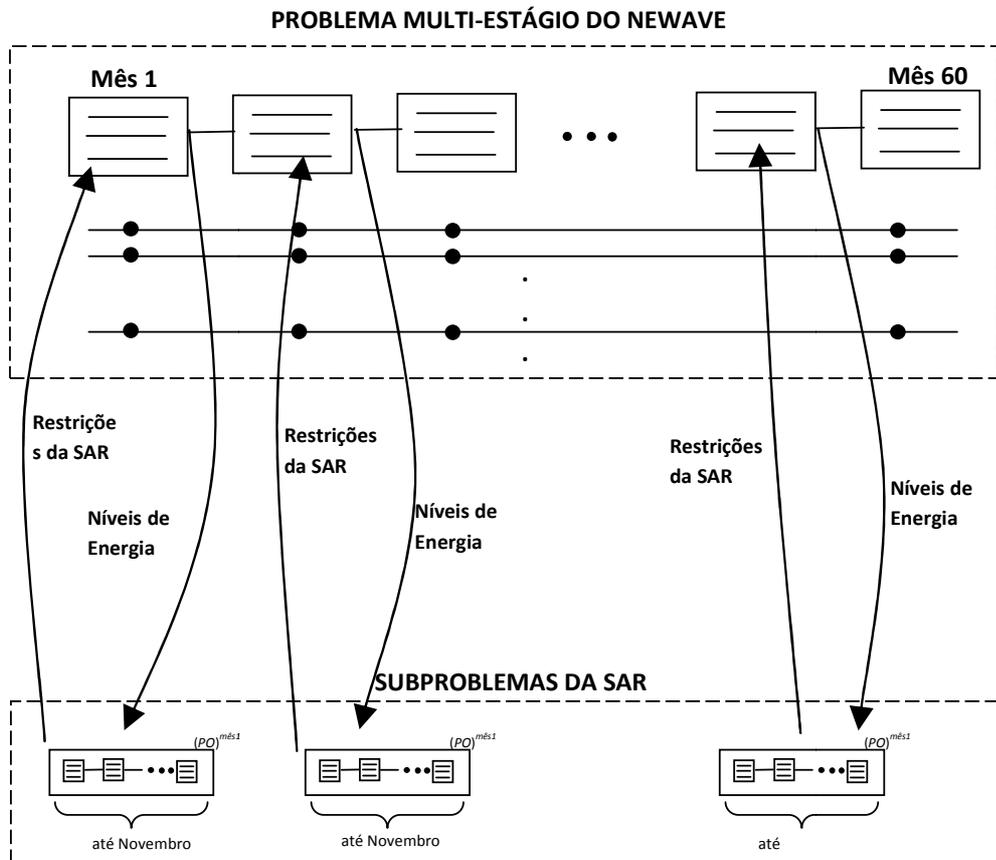


Figura 2.4 – Processo iterativo geral de consideração da SAR no problema NEWAVE

A série hidrológica que será considerada no horizonte do problema determinístico de construção das restrições da SAR pode ser *condicionada* ou *não condicionada*.

No 1º caso, a série hidrológica é construída para cada um dos cenários de todos os estados da simulação backward e para cada um dos cenários da simulação forward, com base nas afluições passadas em cada um dos respectivos cenários. Neste caso, as restrições da SAR, além de serem função dos armazenamentos em cada um dos subsistemas, são também função das afluições passadas. No caso de série hidrológica não condicionada às afluições passadas pode se escolher, por exemplo, uma série do histórico de afluições, que será utilizada em todos os cenários e estados da simulação backward e em todos os cenários da simulação forward. Neste caso, as restrições da SAR são função apenas dos armazenamentos em cada um dos subsistemas.

2.2.1.2 Incorporação no Modelo DECOMP

A função de custo futuro utilizada pelo modelo DECOMP ao final do seu horizonte de planejamento já incorpora implicitamente, através de valores da água mais elevados, uma medida de aversão a risco para o horizonte do NEWAVE. Entretanto, a fim de incorporar informações mais detalhadas referentes ao estado operativo do sistema, pode-se adotar duas alternativas:

- a aplicação do mesmo processo iterativo descrito na seção 2.1.1 para os subproblemas do DECOMP. Neste caso, a SAR seria função do vetor de armazenamentos dos reservatórios das usinas hidroelétricas, e o subproblema da SAR seria similar ao problema de “PL-Único” resolvido atualmente durante o POCP;
- pode-se inserir, no modelo DECOMP, o conjunto de restrições da SAR construídos pelo modelo NEWAVE a nível de reservatório equivalente, para os meses compreendidos no horizonte do DECOMP.

A Nota Técnica Superfície de Aversão a Risco no Modelo DECOMP detalha os dois procedimentos listados acima.

2.3 Entrada de Dados

O arquivo que contém os nomes dos arquivos utilizados pelo programa NEWAVE (arquivos.dat) possui mais um registro especificando o nome do arquivo que contém os dados do Mecanismo de Aversão a Risco: SAR (ex: “rsar.dat”). Neste arquivo devem ser fornecidos o mês de aplicação do nível meta, o valor da penalidade pelo não atendimento das restrições da SAR, o nível meta de cada ano do horizonte de estudo da SAR, os meses para os quais serão construídas restrições da SAR e a série hidrológica que será considerada no problema de construção das restrições da SAR. A série hidrológica considerada pode ser: (i) condicionada às energias afluentes passadas de cada estado da PDDE. Neste caso o próprio modelo constrói automaticamente esta série hidrológica para cada estado e estágio do horizonte de estudo; (ii) uma série do histórico de afluições; (iii) construída a partir de um percentual da média mensal.

O arquivo de dados gerais (dger.dat) contém um flag para utilização de mecanismo de aversão a risco: SAR, que deve ser preenchido com 1 caso se deseje utilizar a funcionalidade.

O Manual do Usuário do programa NEWAVE [9] descreve todas as alterações referentes a esta nova funcionalidade.

2.4 Referências

- [1] <http://www4.planalto.gov.br/legislacao/search?SearchableText=Resolu%C3%A7%C3%A3o+n%C2%BA+2+de+16+de+janeiro+de+2002>
- [2] V.S.Duarte, D.D.J.Penna, M.E.P.Maceira, L.A.M.Moraes, “Modelo estratégico de geração hidrotérmica a subsistemas - NEWAVE, Manual do Usuário”, Relatório Técnico CEPEL, nº 52159/04, 2004.
- [3] CEPEL, Nota Técnica “Status do Processo de Introdução de Metodologias de Aversão ao Risco no Modelo NEWAVE”, Julho de 2003.
- [4] http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/CNPE/resolucao_2007/Resoluxo_8_CNPE_ALT.pdf
- [5] ONS, Nota Técnica 050/2010 “Metodologia de Segurança Operativa – Níveis Meta de Armazenamento. Relatório Consolidado dos Procedimentos Operativos de Curto Prazo com Proposta de Mudança da Série de Referência”, 2010.
- [6] http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/CNPE/resolucao_2013/Resolucao_CNPE_3_2013.pdf
- [7] PSR, Apresentação “Possíveis Aperfeiçoamentos da Curva de Aversão a Risco” no ONS em 19 de março de 2008, Rio de Janeiro, 2008.
- [8] 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.
- [9] D.D.J.Penna, C.L.V.Vasconcellos, M.I.A.Ennes, A.L.Diniz, M.E.P.Maceira, “Modelo estratégico de geração hidrotérmica a subsistemas - NEWAVE, Manual do Usuário”, Relatório Técnico CEPEL, nº 16010/13, 2013.

3. NOTA TÉCNICA nº 66 - Mecanismos Alternativos de Aversão a Risco - Valor Condicionado a um Dado Risco (Maio 2013)

3.1 Introdução

Com o advento do racionamento de energia elétrica entre 2000 e 2001, o Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico, em seu Relatório de Progresso N^o 2, (Jan/2002), Tema 21 - Procedimentos de alerta quanto a dificuldades de suprimento, Documento de Apoio C: “Aversão a Risco - Proposta Metodológica” [1], propôs uma metodologia para a consideração da aversão a risco no cálculo da política ótima de operação do sistema de geração brasileiro.

Nesta metodologia, é definida uma curva de volume mínimo operativo para cada subsistema e também uma penalidade que é aplicada à diferença entre o volume mínimo operativo e a energia armazenada em um subsistema no final de cada mês (estágio), quando esta for inferior ao volume mínimo operativo. Este fator de penalização (R\$/MWh), determinado pela ANEEL, propiciaria, em princípio, o despacho de geração térmica adicional para restabelecer o volume mínimo desejado.

Esta metodologia, aqui denominada de “penalidade original”, foi implementada no Programa NEWAVE e disponibilizada ao ONS para testes em Junho de 2002 [2]. Após os testes realizados, concluiu-se que, embora matematicamente consistente, poderia provocar, em diversas situações, uma elevação acentuada nos custos marginais de operação dos subsistemas.

Posteriormente, foi desenvolvida, pelo ONS e seus consultores, uma alternativa metodológica, denominada “penalidade criativa”, que é ajustável ao longo das iterações da programação dinâmica dual estocástica, a fim de diminuir o efeito cumulativo nos custos marginais de operação, mencionado anteriormente. Este procedimento é atualmente empregado no modelo NEWAVE para a realização dos PMOs. Entretanto, devido a dificuldades técnicas [3], o mesmo não pode ser estendido para o modelo DECOMP.

A aplicação da CAR com “penalidade criativa” tem sido utilizada no modelo NEWAVE desde 2004. Entretanto, com o passar do tempo, a mesma tem se mostrado incapaz de fornecer uma sinalização adequada o suficiente para indicar um despacho térmico mais seguro no modelo DECOMP e, conseqüentemente, um maior valor de PLD.

Com o objetivo de garantir maior segurança no abastecimento e minimizar os riscos de racionamento, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), por meio da Resolução nº 8/2007 [4] estabeleceu que, extraordinariamente, com vistas à garantia do suprimento energético, o ONS poderia despachar recursos energéticos fora da ordem do mérito econômico ou mudar o sentido do intercâmbio entre submercados, por decisão do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE. Determinou

também que o despacho de recursos para recuperar o nível de segurança (CAR) do estoque não seria computado na formação do PLD.

Posteriormente, a Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP), por meio do Grupo de Trabalho “Revisão da Metodologia do POCP/Nível Meta” [5] aprovou uma sistemática para a determinação do acionamento extraordinário de usinas térmicas por razão de segurança energética, chamados de Procedimentos Operativos de Curto Prazo - POCP, os quais são baseados na definição de níveis meta para o mês de novembro de cada ano, nas regiões SE/CO e NE.

O acoplamento temporal das decisões em um sistema hidrotérmico com predominância hidroelétrica, como o SIN, faz com que uma decisão tomada em determinado momento tenha impactos sobre o futuro. Assim, a elevação no nível do armazenamento decorrente da geração termelétrica adicional, por segurança energética, tem efeitos sobre a formação dos preços não só no estágio de tempo atual, como nos estágios temporais subseqüentes.

No entanto, a utilização destes mecanismos complementares de acionamento de usinas térmicas influencia o nível de armazenamento dos reservatórios e pode provocar uma redução artificial no PLD nos estágios seguintes.

A Figura 1.1 ilustra o efeito do despacho por segurança energética sobre os PLDs dos estágios seguintes.

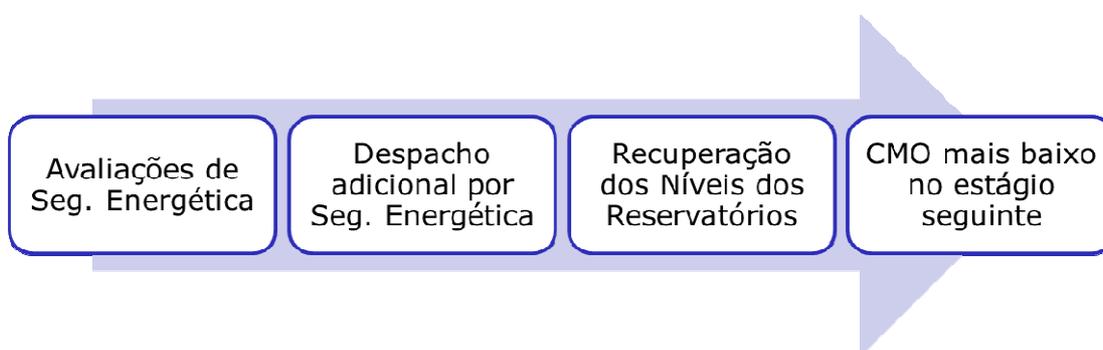


Figura 1.1 – Efeito do despacho por segurança energética sobre os PLDs dos estágios seguintes.

Dessa forma, observa-se um ciclo em que o despacho por segurança reduz os preços dos estágios seguintes, podendo provocar distorções no atual modelo de precificação.

Assim, é importante 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. Neste sentido, o Cepel vem pesquisando e desenvolvendo este assunto há alguns anos.

Com este objetivo, o CNPE editou em 6 de março do corrente ano, a Resolução nº 3/2013 [6], a qual determinou que a CPAMP desenvolva e implemente metodologia para internalização de mecanismos de aversão a risco nos programas computacionais para estudos energéticos e formação de preço, realizando

os ajustes necessários nas disposições referentes ao atendimento energético, à formação de preço e aos Encargos de Serviços do Sistema.

3.2 Mecanismos Alternativos de Aversão a Risco (MAR)

Nos modelos em uso atualmente, o problema de otimização tem sido concebido com o critério de mínimo custo, onde o objetivo é obter uma política de operação que minimize o valor esperado da geração térmica e eventuais cortes de carga, considerando-se um dado conjunto de possíveis cenários de afluências futuras aos reservatórios. Recentemente, vide revisão bibliográfica em [7], tem sido proposto introduzir uma medida de risco adicional denominada CVaR – valor condicionado a um dado risco - no contexto da programação dinâmica dual estocástica (PDDE), seja através do uso de variáveis artificiais [8], [9] ou por uma abordagem direta [7]. Atualmente, parece haver um consenso de que a abordagem direta, por ser bastante intuitiva e de fácil implementação, é mais eficiente para resolver esse problema, visto que também tem sido adotada em outros trabalhos relacionados ao planejamento da operação [10], [11].

Nesta Nota Técnica será descrito o mecanismo de aversão a risco Valor Condicionado a um Dado Risco - CVaR, como proposto em [7], para manter ou até elevar a segurança do sistema, com o reflexo correspondente no valor do PLD utilizado para o mercado de curto prazo.

A Nota Técnica 65 do Projeto NEWAVE descreve o mecanismo alternativo de aversão a risco, Superfície de aversão a risco – SAR.

3.2.1 Valor Condicionado a um Dado Risco (CVaR)

O mecanismo de aversão a risco Valor Condicionado a um Dado Risco (CVaR) visa dar maior importância aos cenários hidrológicos mais críticos no cálculo da política de operação, da seguinte forma:

- a função objetivo, além de minimizar o valor esperado do custo total de operação com um determinado peso $(1-\lambda)$, considera também uma parcela adicional referente ao custo dos cenários hidrológicos mais críticos, com um peso λ ;
- O conjunto de cenários hidrológicos mais críticos é identificado por meio de um parâmetro α , relacionado ao nível de proteção e que indica o percentual do total dos cenários daquele período que será considerado com custo adicional na função objetivo, como ilustrado em vermelho à direita na Figura 2.1.

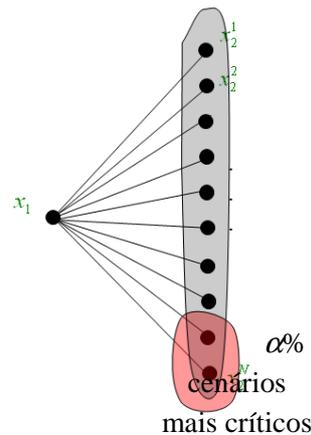


Figura 2.1 – Indicação dos cenários mais críticos em cada estado do modelo NEWAVE

A expressão a seguir mostra a função objetivo do problema com os termos referentes ao *CVaR*, considerando, para facilitar a exposição, o caso simples de um problema de dois estágios, onde $c_t x_t$ corresponde ao custo de geração térmica + déficit no estágio t .

$$\min_{x_1} \left[c_1 x_1 + \underbrace{(1 - \lambda)}_{\text{Peso para o valor esperado}} E \left[\min_{x_2} c_2 x_2 \right] + \underbrace{\lambda}_{\text{Peso para o CVaR}} \underbrace{CVaR}_{\text{Nível de proteção } \alpha} \left[\min_{x_2} c_2 x_2 \right] \right]$$

Uma vez definidos os valores dos parâmetros λ e α , pode-se aplicar diretamente a metodologia de PDDE **no modelo NEWAVE** para resolver o problema multi-estágio de planejamento da operação, de acordo com o seguinte procedimento:

- resolver os subproblemas para todos os K cenários *backward*;
- identificar os $\alpha\%$ maiores valores de custo ($z_{t,w}$);
- Construir cortes levando em consideração tanto o valor esperado como o *CVaR*;

A Figura 2.2 ilustra o procedimento de cálculo dos cortes de Benders, onde os termos em vermelho indicam a participação dos cenários mais críticos no cálculo dos coeficientes.

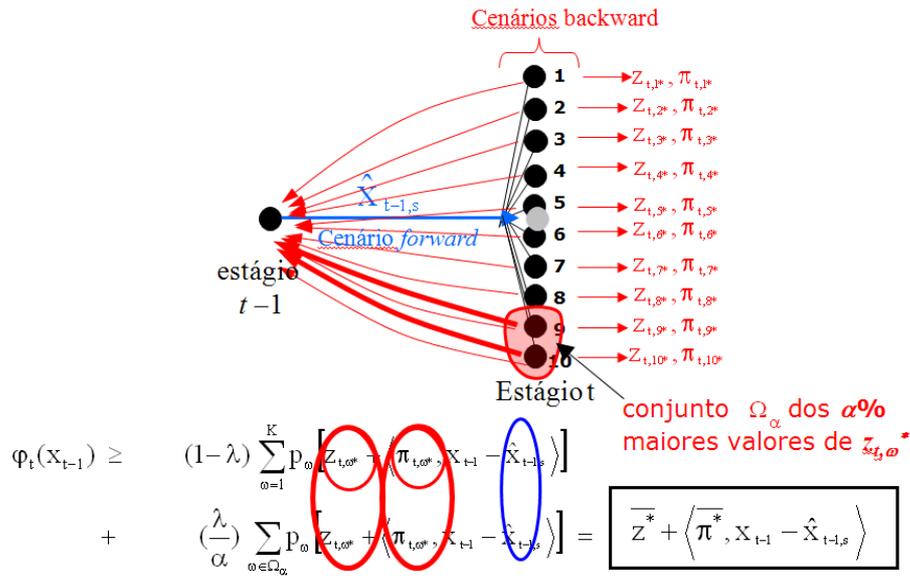


Figura 2.2 – procedimento de cálculo dos cortes de Benders

Observa-se que, apesar da função de custo futuro ter a mesma estrutura em relação à minimização do valor esperado (vide expressão no retângulo), os valores da água naturalmente serão mais elevados na abordagem CVaR, visto que os termos que correspondem aos cenários mais críticos, dos quais se quer proteger, possuem peso bem maior em relação aos demais.

3.2.1.1 Calibração dos parâmetros λ e α

Uma dificuldade importante dessa metodologia é a determinação dos parâmetros λ e α . A política de operação se torna tanto mais avessa ao risco quanto mais o valor de λ se aproximar de 1, e quanto mais o percentual α se aproximar de zero. Ressalta-se que, no caso multi-estágio, o nível α não corresponde à interpretação usual de serem os $\alpha\%$ cenários mais críticos utilizados em simulações com o modelo, do primeiro ao último ano do horizonte de planejamento. A cada estágio, este parâmetro corresponde aos $\alpha\%$ cenários mais críticos do próprio estágio. Portanto, no caso de CVaR puro ($\lambda=1$), a aplicação do fator α em um contexto multi-estágio de T períodos leva a um nível de proteção de α^T , conforme ilustrado na Figura 2.3, para um exemplo com T=4 e $\alpha=25\%$.

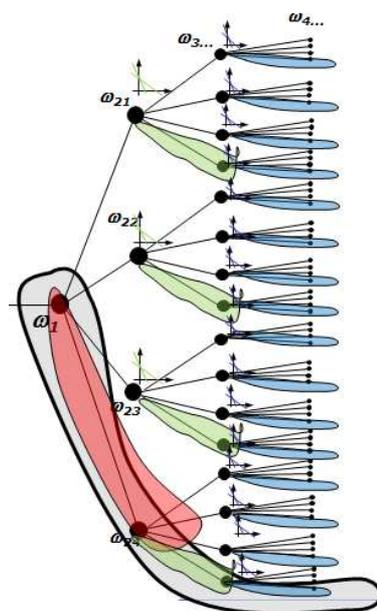


Figura 2.3 – Aspecto acumulativo do fator α na modelagem do CVaR.

Nesta figura, o fator de proteção para um período é de 25%, porém o efeito acumulativo da aplicação de α leva a um nível de proteção de $(0,25)^4 \sim 1,6\%$ do conjunto de cenários em um horizonte de 4 estágios. Em um contexto do planejamento de operação com $T = 60$ estágios, com aplicação de CVaR puro, um nível de proteção para 5% dos cenários multi-período corresponderia a um fator de proteção por período de $\alpha = 97,5\%$.

3.2.1.2 Aplicação ao Modelo DECOMP

A metodologia CVaR pode ser aplicada no modelo DECOMP de forma similar à do modelo NEWAVE, dando-se um peso maior para os $\alpha\%$ cenários mais críticos do 2º mês no cálculo da função de custo futuro para o primeiro mês.

A Nota Técnica Valor Condicionado a um Dado Risco no Modelo DECOMP detalha o procedimento listado acima.

3.3 Entrada de Dados

O arquivo que contém os nomes dos arquivos utilizados pelo programa NEWAVE (arquivos.dat) possui mais um registro especificando o nome do arquivo que contém os dados do Mecanismo de Aversão a Risco: CVaR (ex: “cvar.dat”). Neste arquivo devem ser fornecidos o percentual do total dos cenários de um período, de custo mais elevado, que será considerado com custo adicional na função objetivo (α) e o peso da parcela adicional que será considerada na função objetivo do problema de otimização, referente ao custo esperado dos (α) cenários mais críticos (λ). Os valores de α e λ podem ser variáveis por mês ao longo de todos os anos do horizonte de estudo.

O arquivo de dados gerais (dger.dat) contém um flag para utilização de mecanismo de aversão a risco: CVaR, que deve ser preenchido com o valor “1” caso se deseje utilizar a funcionalidade

considerando os parâmetros α e λ constantes ao longo do horizonte ou com o valor “2” se os parâmetros forem variáveis.

O Manual do Usuário do programa NEWAVE [12] descreve todas as alterações referentes a esta nova funcionalidade.

3.4 Referências

- [1] <http://www4.planalto.gov.br/legislacao/search?SearchableText=Resolu%C3%A7%C3%A3o+n%C2%BA+2+de+16+de+janeiro+de+2002>
- [2] V.S.Duarte, D.D.J.Penna, M.E.P.Maceira, L.A.M.Moraes, “Modelo estratégico de geração hidrotérmica a subsistemas - NEWAVE, Manual do Usuário”, Relatório Técnico CEPEL, nº 52159/04, 2004.
- [3] CEPEL, Nota Técnica “Status do Processo de Introdução de Metodologias de Aversão ao Risco no Modelo NEWAVE”, Julho de 2003.
- [4] http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/CNPE/resolucao_2007/Resoluxo_8_CNPE_ALT.pdf
- [5] ONS, Nota Técnica 050/2010 “Metodologia de Segurança Operativa – Níveis Meta de Armazenamento. Relatório Consolidado dos Procedimentos Operativos de Curto Prazo com Proposta de Mudança da Série de Referência”, 2010.
- [6] http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/CNPE/resolucao_2013/Resolucao_CNPE_3_2013.pdf
- [7] 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 - Symp. of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Maio 2012.
- [8] A.B. Philpott, V.L. Matos, “Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion”, Eur. J. Oper. Res, v. 218, 470-483, 2012 (Technical report presented on Optimization Online in Dec. 2010).
- [9] 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, 2011.
- [10] A. Shapiro, W. Tekaya, J.P. Costa, M.P. Soares, “Risk neutral and risk averse Stochastic Dual Dynamic Programming method”, Eur. J. Oper.Res., v.224, n.2, pp. 375-391, Jan. 2013.
- [11] A.B. Philpott, V.L. Matos, E.C. Finardi, “On solving multistage stochastic programs with coherent risk measures”, Optimization Online, Aug. 2012
- [12] D.D.J.Penna, C.L.V.Vasconcellos, M.I.A.Ennes, A.L.Diniz, M.E.P.Maceira, “Modelo estratégico de geração hidrotérmica a subsistemas - NEWAVE, Manual do Usuário”, Relatório Técnico CEPEL, nº 16010/2013, 2013.