



XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

CB/GPL/12

## GRUPO – VII

### GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GPL

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

C.L. VASCONCELLOS(\*)<sup>1</sup>, A. L. DINIZ<sup>1,2</sup>, M.E.P. MACEIRA<sup>1,2</sup>, C.L.T. BORGES<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

<sup>2</sup>UERJ -Universidade do Estado do Rio de Janeiro

<sup>3</sup>COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro-Departamento de Engenharia Elétrica

## RESUMO

Recentemente, foi proposta para o planejamento da operação hidrotérmica a “Superfície de aversão a risco” (SAR), metodologia na qual resolvem-se subproblemas adicionais na PDDE para garantir o suprimento em cenários críticos de afluência. A implementação original deste método adicionava variáveis de folga às restrições da SAR, cujo acionamento em períodos consecutivos acarretava custos marginais de operação muito elevados. Este trabalho propõe penalizar a máxima violação ao longo desses períodos, com valores de referência intuitivos, como o custo da térmica mais cara. Propõe-se ainda a construção a priori da SAR, para acelerar o tempo computacional. Apresentam-se resultados para o sistema Brasileiro.

## PALAVRAS-CHAVE

Mecanismo de Aversão a Risco, Otimização Estocástica, Planejamento da Operação Energética, Sistemas Hidrotérmicos, Programação Paralela

### 1.0 - 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, observando as condições operativas e restrições elétricas do sistema e procurando minimizar o custo de operação. Com o objetivo de atender às cargas garantindo a segurança no fornecimento de energia, em 2013 foram internalizadas no modelo de longo/ médio prazo (NEWAVE) (1) duas metodologias para aversão a risco: o Conditional Value at Risk (CVaR) (2) e a Superfície de aversão a risco (SAR) (3), que se integram à estratégia de programação dinâmica dual estocástica (PDDE) (4) com um modelo autorregressivo periódico para representar as energias afluentes (5), que é empregada para resolver o problema de otimização estocástica. No mecanismo de aversão a risco CVaR, a função objetivo do problema de despacho de operação, 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  $\lambda$ . Já o mecanismo de aversão a risco SAR tem por objetivo construir níveis mínimos seguros para as energias armazenadas nos reservatórios equivalentes de energia (REE), levando em consideração a operação interligada dos subsistemas a fim de atender níveis meta de armazenamento em cada REE ao final da estação seca sem a ocorrência de deficits.

Durante o processo de validação da incorporação dos mecanismos de aversão a risco no modelo NEWAVE, conduzido pela Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico CPAMP/MME no ano de 2013 (6), a metodologia SAR apresentou duas desvantagens em relação ao CVaR: o elevado tempo computacional e a perda do sentido intuitivo no valor a ser utilizado para a penalização pelo não atendimento às restrições da SAR, pois a utilização do valor de referência desejado, que é o custo do primeiro patamar de déficit ou o da térmica mais cara, levava a valores de custo marginal de operação (CMO) muito elevados devido ao efeito acumulativo da violação das restrições da SAR em períodos consecutivos. Como consequência, este trabalho apresenta dois aprimoramentos na metodologia original da SAR (7), que foram propostos originalmente pelos autores em (3), (6): (i) uma nova formulação para a penalização pelo não atendimento a essas restrições, descrita na seção 3.1; (ii) a construção a priori das restrições da SAR, antes de

(\*) Av. Horácio Macedo, 354, CEP: 21.941-911, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Tel: (+55 21) 2598-6011 – Email: cesarluis@cepel.br

resolver o problema por PDDE, descrita na seção 3.2. A nova metodologia é denominada NOVA SAR.

## 2.0 - O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO HIDROTÉRMICO DE MÉDIO PRAZO

O problema de planejamento no Brasil é complexo, devido ao grande número de usinas hidráulicas e térmicas, e à incerteza nas afluições futuras às usinas hidroelétricas. Devido a essa complexidade de operação e à 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 (8), que são também utilizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE – para obter os preços de liquidação de diferenças no mercado de curto prazo de energia elétrica. Em particular, para o planejamento de longo e médio prazos, designados neste trabalho pela sigla MTHTP, utiliza-se o modelo NEWAVE (1), cujo objetivo principal é obter uma política ótima mensal de operação, para um horizonte de 10 a 15 anos. Devido ao elevado esforço computacional, as usinas hidroelétricas são representadas por meio de REE's (9), porém o processo estocástico das afluições às usinas é modelado com detalhes por um modelo autorregressivo periódico - PAR(p) (10), que procura preservar tanto a correlação temporal como a espacial entre as afluições aos diferentes REE's. A geração de cenários é feita pela técnica de amostragem seletiva (11). Como é impossível visitar todos os possíveis cenários multistágio, o problema é resolvido pela técnica de PDDE (4), (5), com  $S$  cenários multistágio (séries) em cada recursão *forward* e todos os  $K$  cenários por período na geração dos cortes de Benders durante a recursão *backward*, como indica a Figura 1b.

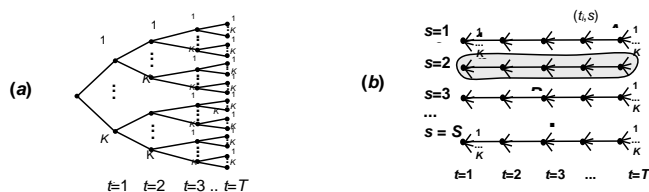


FIGURA 1 – Representação esquemática dos cenários de afluições considerado no modelo NEWAVE.

A aplicação da PDDE leva a uma decomposição do problema como um todo em subproblemas menores, pela formulação recursiva apresentada na equação (1a) a seguir. O subproblema de cada período é formulado pela expressão (1b). O vetor  $x_t$  engloba todas as variáveis de decisão do estágio  $t$  em cada subproblema, destacando-se as componentes  $x_{gt}$ ,  $x_{gh}$ ,  $x_v$ ,  $x_{mt}$ , que correspondem à geração térmica, geração hidroelétrica, energia armazenada final dos REE's e intercâmbios entre subsistemas. A função objetivo é a soma do valor esperado dos custos lineares de geração térmica, incluindo-se o déficit como uma usina térmica fictícia. As duas principais restrições de cada subproblema são o atendimento à demanda  $d_t$  e as equações de balanço de energia nos reservatórios equivalentes. Por questões de espaço, denota-se por  $X_t$  a região viável definida por todas as demais restrições do problema, cuja formulação mais detalhada pode ser encontrada em (1), (9)-(13).

$$\begin{aligned}
 Z^* &= E[\varphi_1(x_0, \xi_1)] = \min_{x_1} c_1 x_1 + E_{\xi_1}[\varphi_2(x_1, \xi_2)] \\
 \text{s.t. } &g_1(x_1) = b_1 \\
 &x_1 \in X \\
 \text{onde, para } t &= 2, \dots, T: \\
 \varphi_t(x_{t-1}, \xi_t) &= \min_{x_t} c_t x_t + E_{\xi_t}[\varphi_{t+1}(x_t, \xi_{t+1})] \\
 \text{s.t. } &g_t(x_t) = b_t(x_{t-1}, \xi_{t-1}, \dots, \xi_t) \\
 &x_t \in X_t
 \end{aligned}
 \quad \left| \quad \begin{aligned}
 \varphi_t(x_{t-1}, \xi_t) &= \\
 \left\{ \begin{aligned}
 &\min c_t x_{gt} + \left( \frac{1}{1+\beta} \right) CF_t(x_{vt}, \xi_{t-p}, \dots, \xi_{t-1}) \\
 &\text{s.t.} \\
 &x_{gt}^{s, \omega} + x_{gh}^{s, \omega} + x_{bt}^{s, \omega} = d_t \\
 &x_{vt}^{s, \omega} - x_{vt-1}^{s, \omega} + x_{gh}^{s, \omega} = \frac{p}{\sigma_t} \xi_{t-p, p=1, \dots, p} \\
 &x_t^{s, \omega} \in X_t
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right. \quad (1a) | (1b)$$

### 2.1 Aplicação da superfície de aversão a risco - SAR

A SAR é um aprimoramento da Curva de aversão a risco (CAR) (14), onde ao invés de serem consideradas curvas guias para os REE's de forma individual, consideram-se de forma explícita em sua construção os intercâmbios de energia entre subsistemas, levando a restrições que envolvem uma combinação dos armazenamentos nos REE's.

Ela também pode ser construída internamente ao algoritmo da PDDE, levando-se em conta todas as características da configuração do sistema hidrotérmico. A concepção original da superfície de aversão a risco, proposta inicialmente por (15) e depois formulada formalmente e aprimorada em (16), (3), consiste na resolução de um problema adicional determinístico multiperíodo ("subproblema SAR") para cada período, série e abertura (cenário) da PDDE, onde o objetivo é atingir certo nível meta de armazenamento ao final do período seco sem a ocorrência de déficit, considerando um cenário crítico de afluição. Caso ocorra déficit neste subproblema, são construídos cortes de viabilidade ("cortes da SAR") que serão adicionadas no problema da PDDE. Esses cortes traduzem uma condição para a combinação mínima de armazenamento nos REE's do sistema para que seja

possível atender ao nível meta de armazenamento sem a ocorrência de déficit. A Figura 2, extraída de (3) ilustra o processo iterativo entre o subproblema da PDDE e o subproblema SAR.

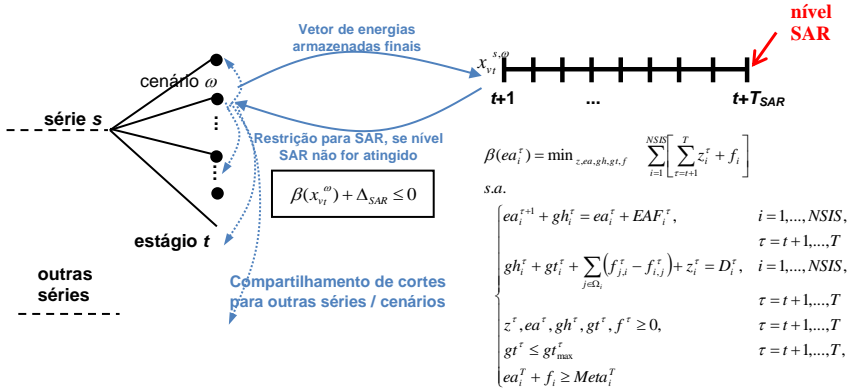


FIGURA 2 – Processo iterativo entre a resolução do subproblema da PDDE e do subproblema SAR.

Porém, nem sempre é possível atender a esta restrição devido ao estado inicial dos REE's e/ou ao cenário de afluência para o subproblema correspondente da PDDE. Portanto, faz-se necessária a adição de uma variável de folga para violação das restrições da SAR, que deverá ser penalizada na função objetivo, idealmente com um custo próximo ao do primeiro patamar de déficit ou da térmica mais cara. Entretanto, a violação sucessiva das restrições SAR em períodos consecutivos em sua primeira abordagem (16), (6), levava a valores de custo marginal de operação (CMO) muito elevados, o que resultou na aplicação de um valor de penalidade muito inferior, acarretando na perda do sentido intuitivo desse parâmetro. Outro inconveniente da SAR original foi o elevado tempo computacional para resolução do problema.

### 3.0 - NOVA PROPOSTA DE PENALIZAÇÃO PARA VIOLAÇÃO DA SAR ("NOVA SAR")

Neste trabalho propõe-se uma nova formulação para a penalização pelo não atendimento às restrições da SAR, com o objetivo de evitar o efeito cumulativo de penalidade pelo seu não atendimento. Nessa metodologia, diferentemente da forma de penalização atual, onde a violação é penalizada a todo período, **apenas a maior violação entre todos os períodos é penalizada**, e sua aplicação é feita **somente no período anterior ao do nível meta**. Entretanto, esta formulação gera um acoplamento temporal adicional entre os subproblemas da PDDE, pois é necessário incluir restrições envolvendo variáveis de diferentes períodos de tempo. Isto resultou também na inclusão de uma variável de estado adicional na função de custo futuro, com ajustes correspondentes na construção dos cortes de Benders e obtenção dos fatores de sensibilidade em relação a essas restrições.

Essa nova formulação evita o acúmulo de penalidades, garantindo um caráter intuitivo para escolha do valor da penalidade a ser utilizado. Uma descrição resumida dessa proposta é apresentada a seguir, para maiores detalhes consulte (7).

#### 3.1 Inclusão de novas restrições no subproblema da PDDE

A discretização dos subproblemas do NEWAVE é por período, e o valor a ser penalizado é a maior violação entre todos os períodos onde há restrições 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:

$$-\pi_{v\ SAR}^t \ EARM_t^\omega + \delta_{SAR}^t \geq RHS_{SAR} \quad (2)$$

$$MX_t \geq \delta_{SAR}^t \quad (3)$$

$$MX_t \geq MX_{t-1} \quad (4)$$

onde:

$EARM_t^\omega$  vetor de armazenamentos dos REE's no cenário  $\omega$  do período  $t$ ;

$\delta_{SAR}^t$  montante de violação da SAR no período  $t$ ;

$RHS_{SAR}$  termo independente da aproximação de Taylor;

$MX_t$  máxima violação da SAR, até o período  $t$ ;

$\pi_{v\ SAR}^t$  vetor de coeficientes associado aos armazenamentos do REE's.

A restrição (2) 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 (3) e (4) 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:

$$\text{CustoSAR} = MX_{T_{SAR}-1} \times \text{PenalidadeSAR} \quad (5)$$

### 3.2 Inclusão de nova variável de estado

Na metodologia da NOVA SAR, 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:

$$\alpha \geq RHS + \pi_v^t EARM_t^\omega + \pi_a^t EAF_t^\omega - \pi_{MX}^t MX_t^\omega \quad (6)$$

onde  $\pi_{MX}^t$  é a variável dual associada à restrição  $MX_t \geq MX_{t-1}$  e  $\pi_a^t$  é o vetor de coeficientes associado às afliências aos REE's.

### 3.3 Discussão sobre a inclusão das restrições nos passos *forward* e *backward* da PDDE

Ao incluir as restrições (3) e (4), a otimização da operação faz com que, ao ocorrer uma violação de um montante  $\delta$  no período  $t-1$ , haja um estímulo para violar a restrição também no período  $t$ , no mesmo montante  $\delta$  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 haverá uma retomada dos reservatórios 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 novas restrições, podem ser atingidos estados indesejados, ou seja, com armazenamento muito baixos devido a indução causada pela restrição (4). Assim, embora durante o passo *backward* as três restrições sejam consideradas, no passo *forward* e na simulação final a restrição (4) é removida.

## 4.0 - CONSTRUÇÃO A PRIORI DAS RESTRIÇÕES DA SAR

Na metodologia original da SAR (3), os vetores de armazenamentos dos REE's obtidos após a solução de um subproblema do NEWAVE são utilizados como entrada para o subproblema da SAR. Neste trabalho, o vetor de armazenamentos dos REE's também é um dado de entrada para o subproblema da SAR, porém este, ao invés de ser obtido a partir de simulações internas ao algoritmo da PDDE, é definido pela combinação dos níveis dos REE's que são discretizados antes de se resolver o problema de PDDE, em cada período. Para tanto, o armazenamento total do REE é dividido em determinado número de pontos, e a combinação de cada discretização do armazenamento para cada REE é considerado como o vetor de entrada para o subproblema da SAR. Nos testes de implementação, observou-se que não era necessário uma grande número de níveis de discretização (densidade da grade) para conseguir uma boa representação da SAR.

Além disso, como as restrições da SAR são obtidas de forma independente por período, podem ser aplicadas técnicas de processamento paralelo, reduzindo consideravelmente o tempo de processamento. Entretanto, ressalta-se que essa alternativa de construção a priori da SAR é viável apenas quando se considera uma SAR "não condicionada", ou seja, o cenário crítico não depende das afliências passadas em cada série *forward*. No caso da SAR condicionada, o vetor de variáveis de estado do corte cresce bastante, pois é necessário incluir as afliências passadas até a ordem  $p$ , para cada REE. Neste caso, recomenda-se a construção da SAR *a posteriori*, ou seja, de forma iterativa ao longo da resolução do problema de PDDE, como proposto originalmente em (3).

## 5.0 - 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, considerando a formulação SAR com penalização original utilizada em (3) "PenAnt" e com a nova forma de penalização proposta neste trabalho. A configuração do sistema elétrico brasileiro deste caso é composto por 162 usinas hidráulicas, divididas em 4 REEs, 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 afliências 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 afliência geradas são iguais em todos os casos. Todos os cenários de afliência são

gerados pelo modelo GEVAZP (10). Os casos foram executados em ambiente multiprocessado, em um cluster com 4 nós e 12 processadores por nó. Os problemas de programação linear são resolvidos com a biblioteca COIN.

### 5.1 Convergência da PDDE

Inicialmente, mostra-se na Figura 3 o processo de convergência da PDDE, onde se pode perceber que, utilizando o valor mais intuitivo de penalidade na metodologia proposta (R\$1000/MWh, próximo ao primeiro patamar de déficit) alcançam-se custos operativos da mesma ordem de grandeza que a implementação original da SAR, na qual foi necessário utilizar um valor de penalidade 10 vezes menor, que não é intuitivo.

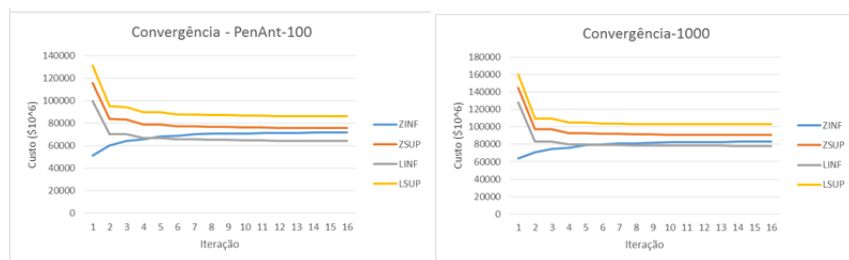


FIGURA 3 – Processo iterativo da SAR com penalidade original (PenAnt) e com a NOVA SAR.

### 5.2 Riscos de déficit

Na Figura 4 mostram-se os riscos de déficit obtidos para dois valores de penalização da concepção original (R\$100/MWh e R\$1000/MWh), e dois valores de penalização para a NOVA SAR: R\$/1000/MWh e o custo da térmica mais cara acrescida de um pequeno valor. Para fins de comparação, incluíram-se também os resultados da opção neutra a risco e da metodologia CVaR, com os valores de penalidades em vigor no ano de 2016 ( $\lambda=0.25$  e  $\alpha=0.50$ , vide (2), (6)). Observa-se que a NOVA SAR é capaz de fornecer riscos de déficit competitivos em relação ao CVaR, promovendo até uma redução para os submercados SE/CO e NE.



FIGURA 4– Riscos de déficit para as abordagens neutra a risco, CVaR e várias alternativas da SAR e NOVA SAR.

### 5.3 Custos Marginais

Na Figura 5 mostram-se os valores de custo marginal de operação (CMO) para essas mesmas alternativas, onde se observa o efeito da nova penalização proposta, reduzindo drasticamente o valor de CMO quando se utiliza o valor de penalidade igual a 1000 (barra azul escura), em relação a esse mesmo valor de penalidade para a SAR original (barra verde).

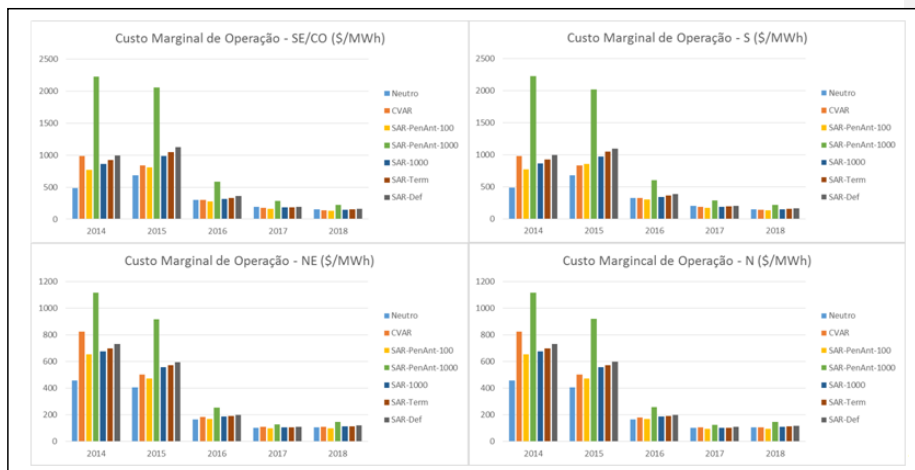


FIGURA 5– Custos marginais de operação (CMO) para abordagens neutra a risco, CVaR e alternativas da SAR e NOVA SAR.

#### 5.4 Distribuição dos armazenamentos no mês do nível meta

O objetivo da SAR é manter os níveis de armazenamentos elevados ao final do período seco (mês de novembro). Para mostrar este efeito, mostram-se na Figura 6 as curvas de permanência do armazenamento final percentual para os REE's do SE e NE ao final de Novembro dos dois primeiros anos do estudo. Percebe-se que a distribuição de armazenamento final para o SE é equivalente entre os casos SAR-PenAnt-1000 e NOVA SAR-1000, sendo que o caso NOVA SAR-1000 apresenta um valor de custo marginal de operação bastante inferior ao caso PenAnt-1000, confirmando que a nova metodologia de penalização resolve o problema da SAR original, referente ao elevado preço da energia. Nota-se ainda que 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 REE do NE em níveis de armazenamento baixos, os valores do caso SAR-1000 são equivalentes no ano de 2017 e superiores no ano de 2015, quando comparados ao CVaR. Assim, as distribuições mostram que para o caso NOVA 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.

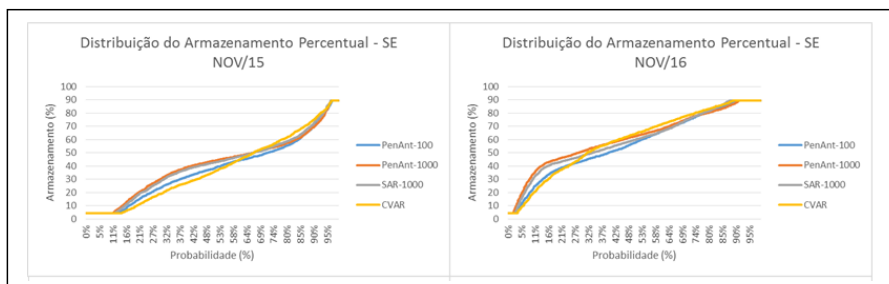


FIGURA 6– Distribuições acumuladas de armazenamentos para o mês de Novembro, para os métodos CVaR, SAR com penalidade original e NOVA SAR.

#### 5.5 Eficiência da SAR a priori

Para avaliar a eficiência da SAR a priori em reduzir o tempo computacional foram executados os casos descritos na Figura 7, onde também se apresenta 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.

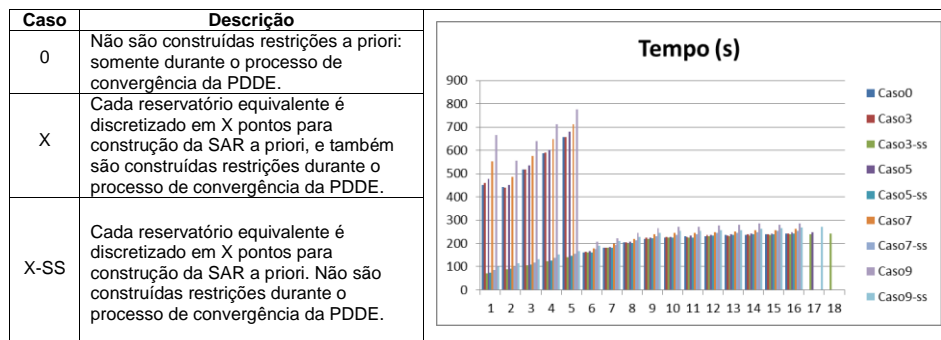


FIGURA 7– Descrição das variantes de caso da Nova SAR, para avaliação da eficiência do processamento paralelo, e tempos computacionais ao longo das iterações da PDDE.

No entanto, estudos posteriores mostram que a medida que a configuração do sistema apresenta um número maior de REE's, a competitividade da SAR a priori diminui.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um aprimoramento na metodologia de superfície de aversão a risco (SAR), implementada em 2013 no modelo NEWAVE, de forma a contornar o seu principalmente inconveniente, que era o acúmulo de penalidades quando havia violações em períodos consecutivos na superfície da SAR. Este acúmulo causava um aumento exagerado no valor da água, forçando uma calibração no valor da penalidade para violação dessas restrições, que em princípio deveria estar associado ao custo unitário da térmica mais cara ou ao custo do primeiro patamar de déficit. Essa metodologia, denominada NOVA SAR, consiste em uma modificação na forma da penalização pelo não atendimento as restrições da SAR, onde se penaliza apenas a máxima violação das restrições da SAR nos subproblemas da PDDE, ao longo do horizonte da SAR em cada ano do período de estudo.

Com isso, evita-se o acúmulo de penalidades e o acréscimo exagerado nos valores de CMO. Resultados mais detalhados da eficiência dessa metodologia, apresentados em (7), mostram que a NOVA SAR é bastante competitiva quando comparada às metodologias CVAR e SAR original (com penalidade reduzida), ao mesmo tempo em que resgata o sentido intuitivo no valor dessa penalidade.

Apresentaram-se também resultados de redução do tempo computacional de 28%, em média, com a construção da SAR a priori, que evita a necessidade de resolver um problema de otimização adicional durante a convergência da PDDE. Entretanto, como 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, sugere-se sua aplicação apenas para o caso da SAR não condicionada.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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 Power Systems Computation Conference - PSCC, Glasgow, SCO, July 2008.
- (2) M.E.P. Maceira, L.G.B. Marzano, D.D.J. Penna, A.L. Diniz, T.C. Justino, "Application of CVaR risk aversion approach in the expansion and operation planning and for setting the spot price in the Brazilian hydrothermal interconnected system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v.72, pp. 126-135. Nov. 2015.
- (3) 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, Rio de Janeiro, 2014.
- (4) M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto, "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning", *Mathematical Programming*, v. 52, n.1-3, pp. 359-375, May 1991.
- (5) 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", Rel. Técnico CEPEL 237/93, 1993.
- (6) CPAMP-Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico, "Desenvolvimento, Implementação e Testes de Validação das Metodologias para Internalização de Mecanismos de Aversão a Risco nos Programas Computacionais para Estudos Energéticos e Formação de Preço". Relatório Técnico, 2013.
- (7) C. L. V. Vasconcellos, "Aprimoramentos na metodologia de superfície de aversão ao risco (sar) para o problema de planejamento de médio/longo prazo da operação de sistemas hidrotérmicos", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2016.

- (8) 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 Comp. Conf. - PSCC'02*, Sevilla, 2002.
- (9) M.E.P. Maceira, V.S. Duarte, D.D.J. Penna, M.P.Tcheou. "An Approach to Consider Hydraulic Coupled Systems in The Construction of Equivalent Reservoir Model in Hydrothermal Operation Planning", *Proceedings of the 17<sup>th</sup> PSCC*, Aug. 2011.
- (10) M. E. Maceira and C. V. Bezerra, "Stochastic Streamflow model for Hydroelectric Systems", 5th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems -PMAPS, Vancouver, Canada, 1997.
- (11) 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, 2011.
- (12) 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.
- (13) M.P. Tcheou, R.N. Cabral, D.D.J. Penna, V.S. Duarte, M.E.P. Maceira, "Modelagem da função de perdas a fio d'água através do MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines)", XII SEPOPE –Symposium of Simposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Rio de Janeiro, Brasil, May. 2012.
- (14) ONS, "Curvas Quinquenais de aversão ao Risco para o Sistema Interligado Nacional -CAR5 2013/2017", Nota Técnica, 2013.
- (15) PSR, "Possíveis Aperfeiçoamentos da Curva de Aversão a Risco", apresentação no ONS, Rio de Janeiro, 19/março/2008.
- (16) 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.

Formatado: Português (Brasil)

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Cesar Luis Vilasbôa de Vasconcellos** possui graduação (2011) e mestrado (2016) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foi Analista de Projeto da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e, desde 2014, é pesquisador do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente (DEA) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL.

**André Luiz Diniz** possui graduação em Engenharia Civil (1997), mestrado em Engenharia de Transportes (2000) e doutorado em Otimização pelo Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (2007), todos pela UFRJ / COPPE. Em 2014 realizou um pós-doutorado no Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics. É pesquisador e chefe do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente (DEA) do CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, do grupo ELETROBRÁS, e professor adjunto da UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, no departamento de Estatística. Tem grande experiência na área de programação matemática e otimização, especialmente aplicada em problemas de planejamento e operação de Sistemas de Energia Elétrica.

**Maria Elvira Piñeiro Maceira** possui graduação (1983) em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, mestrado (1989) e doutorado (1994) em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ. Desde 1985 é pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, atuando no desenvolvimento de metodologias e modelos computacionais nas áreas de planejamento da expansão e operação de sistemas hidrotérmicos, otimização estocástica, hidrologia estocástica, desenvolvimento sustentável de hidroeletricidade, confiabilidade e análise de riscos. De Dezembro de 1999 a Janeiro de 2017, exerceu a chefia da área de otimização energética do Centro através do Programa de Pesquisa Energética e do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente. Também é Professora Adjunta da Universidade Estadual do Rio de Janeiro e membro do Cigré.

**Carmen Tancredo Borges** possui graduação em Engenharia Elétrica pela UERJ (1984), mestrado em Engenharia Elétrica (1991) e doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação pela COPPE/UFRJ (1998). É Professora Titular de Engenharia Elétrica da UFRJ, atuando na pós-graduação da COPPE e na graduação da Poli. Tem experiência de ensino, pesquisa e desenvolvimento de projetos na área de Sistemas de Potência, principalmente em: Análise, Simulação e Otimização, Confiabilidade, Geração Distribuída, Fontes Alternativas, Sistemas Inteligentes e Processamento de Alto Desempenho. É senior member do IEEE e foi presidente do Capítulo PES-Power&Energy Systems da Seção Rio do IEEE de 2012 a 2014.