

# Methodology for determining the energy deficit penalty function for hydrothermal dispatch

Martha R Carvalho  
Dep. Estudos  
PSR  
Rio de Janeiro, Brazil  
martha@psr-inc.com

Bernardo Bezerra  
Dep. Estudos  
PSR  
Rio de Janeiro, Brazil  
bernardo@psr-inc.com

Celso Dall'Orto  
Dep. Estudos  
PSR  
Rio de Janeiro, Brazil  
celso@psr-inc.com

Luiz Carlos Junior  
Dep. Modelos  
PSR  
Rio de Janeiro, Brazil  
luizcarlos@psr-inc.com

José Rosenblatt  
Dep. Estudos  
PSR  
Rio de Janeiro, Brazil  
jrosenb@psr-inc.com

Mario Veiga  
Presidência  
PSR  
Rio de Janeiro, Brazil  
mario@psr-inc.com

**Abstract**— The penalization of the objective function due to energy deficits is a key element for determining the operational policy of hydroelectric reservoirs. Its definition impacts not only operations, but also system expansion. Brazil historically defined these penalties with basis on a proxy of the economic deficit cost, a value in \$/MWh obtained with aid of the Input-Output Matrix. We propose an approach where these penalties are obtained in order to minimize the operation cost and cost of rationing of the system, considering a criterion of security of supply. A case study with data from the Brazilian System illustrates its application.

**Palavras-chave** – custo de déficit, função de penalização, critério de suprimento, valor esperado condicional, planejamento da operação, planejamento da expansão.

## I. INTRODUÇÃO

O objetivo do despacho hidrotérmico no Setor Elétrico Brasileiro é decidir quais recursos de geração utilizar para atender a demanda minimizando os custos de produção totais ao longo do horizonte de planejamento. Como os reservatórios brasileiros possuem capacidade de regularização plurianual das afluições, este processo decisório se caracteriza pelo *trade off* entre utilizar o recurso hidráulico (“estoque”) hoje ou armazená-lo para a utilização futura. Este *trade off*, por sua vez, é obtido pela construção de funções de custos “imediato” e futuro”, por modelos matemáticos baseados em programação dinâmica estocástica 0. Uma vez obtidas estas funções, o operador do sistema pode realizar o despacho das unidades de geração em ordem de mérito econômica.

Como os recursos disponíveis para o atendimento à demanda projetada são finitos e uma porção significativa dos mesmos depende de um recurso aleatório (vazão afluyente aos rios), podem ocorrer situações onde, por insuficiência de água, não haja oferta suficiente para ao atendimento à demanda ao longo de um determinado período, o que resultaria em um déficit de energia. Como a ocorrência de déficits de energia é indesejável, pode ser incorporado no modelo matemático de despacho uma função de penalização na função objetivo do problema de despacho hidrotérmico sempre que há a ocorrência (matemática) de um déficit, onde a penalidade é função da profundidade do déficit de energia. Com isso o problema de despacho hidrotérmico passa a ser o de minimizar o custo operativo termelétrico mais o custo da penalização do déficit de energia ao longo de todo horizonte de planejamento. Em outras palavras, objetiva-se sinalizar que a ocorrência de déficits é indesejável (“custa caro”) e com isso guiar a operação a, de forma

preventiva, utilizar recurso termoeletrico para que a ocorrência de déficits de energia por falta de água seja inexistente, ou que ocorra de acordo com algum critério de suprimento (e.g. como 5% de probabilidade).

Atualmente, o Setor Elétrico Brasileiro utiliza como função de penalização o “custo do déficit” calculado por abordagem econômica 0, e como a mesma é uma função matemática da profundidade do déficit de energia, ela também é chamada de função de custo de déficit. Com isso o despacho hidrotérmico é calculado a partir do *trade-off* na função objetivo entre o custo operativo termelétrico e o impacto de um déficit de energia na economia. A relação entre a função de penalização e a operação do sistema considerando uma restrição de déficit de energia explícita no modelo de despacho hidrotérmico é apresentada em 0. É demonstrado que a restrição de valor esperado da energia não suprida equivale a uma função de penalização linear, que também é conhecida com custo do déficit implícito de 1 patamar 0. Já uma restrição no valor esperado do déficit de energia nos cenários que ocorrem acima de um determinado percentil da distribuição de probabilidade, critério conhecido como *CVaR* do déficit de energia 00, equivale a uma função de penalidade do déficit de dois patamares.

Consequentemente, uma questão central para o Setor Elétrico Brasileiro é investigar a relação existente entre o papel da função de penalização do déficit de energia como sinalizadora econômica do custo do déficit de energia para a sociedade, mas ao mesmo tempo como mecanismo de aversão ao risco na operação, visando garantir um determinado critério de suprimento físico. O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para cálculo de uma função de penalidade do déficit que represente simultaneamente critérios econômicos e de segurança de suprimento explícitos. A metodologia considera ainda o impacto da função de penalização nos custos operativos e nos custos de expansão do sistema, fornecendo ferramenta para avaliar a relação entre critério de suprimento e os custos para a sociedade.

## II. ADEQUABILIDADE ENTRE A FUNÇÃO DE CUSTO DE DÉFICIT E O CRITÉRIO DE SUPRIMENTO

### A. Planejamento da operação hidrotérmica com restrições de confiabilidade

O objetivo do despacho hidrotérmico é minimizar o somatório do custo operativo imediato e do valor presente do custo futuro, ao longo do horizonte de planejamento. No caso do

Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), este horizonte de planejamento é de cinco anos, o que significa que a cada mês o operador decide quais os recursos devem ser despachados para atender a demanda projetada para o horizonte, de maneira a minimizar o valor presente do custo imediato mais valor presente do custo futuro. Como os reservatórios brasileiros possuem capacidade de regularização plurianual das aflúncias, este processo decisório se caracteriza pelo *trade off* entre utilizar o recurso hidráulico hoje ou armazená-lo para a utilização futura, que é feito através da comparação da função de custo imediato com a função de custo futuro. A incerteza com relação às vazões afluentes confere um caráter estocástico para este problema de otimização, que é modelado através de cenários futuros de vazões. Como os recursos disponíveis para o atendimento à demanda projetada são finitos, podem ocorrer situações onde não haja oferta suficiente para ao atendimento à demanda, o que resultaria em um déficit de energia. Este déficit de energia pode ser representado através  $r_t$  da adição da variável de decisão referente ao déficit de energia na equação de atendimento à demanda. A inclusão da variável  $r_t$  implica em um outro *trade off* no processo decisório do despacho hidrotérmico, desta vez entre o despacho de usinas termelétricas e o montante de déficit de energia. Uma alternativa para resolver este dilema é representar no problema o peso relativo entre os déficits de energia e os custos operativos, ou seja, incluir na função objetivo uma penalidade  $\delta$  pela ocorrência de um déficit, também conhecido como custo do déficit, conforme apresentado a seguir:

$$\alpha_t(V_t) = \text{Min} \sum_{j=1}^J c_j g_{tj} + \alpha_{t+1}(V_{t+1}) + \delta r_t \quad (1)$$

Para sistemas puramente termelétricos, que possuem como característica o desacoplamento temporal entre as decisões tomadas em cada estágio do horizonte de planejamento, a inclusão desta variável não altera o despacho do sistema, tendo como funções apenas tornar o problema viável e determinar o custo marginal de operação na ocorrência de um déficit, que seria igual ao custo do déficit  $\delta$ . Já para sistemas hidrotérmicos, o custo do déficit influencia também no custo futuro da operação, uma vez que cenários hidrológicos mais secos podem levar a déficits de energia nos estágios posteriores, o que aumentaria o valor da função de custo futuro. Como consequência, o valor do custo de déficit impacta no *trade off* entre usar o recurso hídrico hoje ou no futuro (despacho termelétrico no presente). Quanto maior o custo de déficit maior o peso que é dado para o custo futuro e maior o despacho termelétrico no presente.

A função de penalização do custo do déficit baseado exclusivamente em métodos econômicos possui como fragilidade a confiabilidade do suprimento de energia ser um resultado do processo de otimização do despacho hidrotérmico, e não um dado de entrada. Por exemplo, se o estudo econômico indicar uma redução do custo de déficit, haverá redução do despacho termelétrico e, conseqüentemente, aumento da probabilidade de ocorrência de déficits no futuro. Por outro lado, um aumento do custo de déficit econômico implica em aumento da confiabilidade de suprimento de energia. Isto ocorre porque o custo de déficit econômico não captura da aversão ao risco da sociedade com relação à frequência ou severidade de racionamentos de energia.

Uma alternativa para considerar a aversão ao risco da sociedade no despacho hidrotérmico independente da função de penalização de custo de déficit, é representar explicitamente a restrição de risco, ou seja, o critério de suprimento de energia, no despacho hidrotérmico. Desta maneira o problema de otimização passa a ser o de minimizar o valor esperado dos custos operativos imediato e futuro, sujeito a uma restrição de risco. Considere a métrica de risco  $\varphi\{\cdot\}$  e o limite para o risco como sendo  $k$ . A formulação simplificada do despacho hidrotérmico com restrição de risco é apresentada a seguir.

$$\alpha_t(V_t) = \text{Min} \sum_{j=1}^J c_j g_{tj} + \alpha_{t+1}(V_{t+1}) \quad (2)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^I \eta_i U_{ti} + \sum_{j=1}^J g_{tj} + r_t = d_t \quad (3)$$

$$\varphi\{r_t\} \leq k. \quad (4)$$

Por exemplo, se a métrica de risco  $\varphi\{\cdot\}$  for o valor esperado, o problema de despacho hidrotérmico passa a ser o de minimizar o valor esperado do custo operativo sujeito a que o valor esperado do déficit de energia seja menor que  $k$ . Se a métrica de risco  $\varphi\{\cdot\}$  for risco de déficit, o problema de despacho passa a ser minimizar o valor esperado do custo operativo sujeito a que o risco de déficit seja menor que  $k$ .

Em resumo, é possível representar a aversão ao déficit de energia através de uma penalização na função objetivo, que por sua vez pode ser calculada através do custo econômico do déficit. A fragilidade desta abordagem é que o critério de suprimento de energia passar a ser um resultado do processo de otimização. Para contornar esta fragilidade é possível representar explicitamente o critério de suprimento no problema de otimização. Será visto a seguir que há uma relação direta entre estas duas abordagens quando a métrica de risco é o valor esperado ou o *CVaR* do déficit.

#### B. Relação entre o *CVaR* do déficit e a função de penalização do déficit

Apresenta-se a seguir uma formulação em árvore estocástica do problema de despacho hidrotérmico, considerando dois estágios e incerteza na vazão apenas no segundo estágio, porém com a restrição do *CVaR* no déficit de energia. Por simplificação foram omitidas as demais restrições do problema (balanço hídrico, limites das variáveis, etc).

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J c_j g_{1j} + \frac{1}{S} \sum_s \sum_{j=1}^J c_j g_{2sj} \quad (5)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^I \eta_i U_{1i} + \sum_{j=1}^J g_{1j} = d_1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \eta_i U_{2si} + \sum_{j=1}^J g_{2sj} + r_{2s} = d_2, \forall s \quad (7)$$

$$b + \frac{1}{\alpha S} \sum_s y_{2s} \leq k. \quad (8)$$

$$y_{2s} \geq r_{2s} - b, \forall s \quad (9)$$

Em 0 é aplicada relaxação lagrangeana no problema acima e transformações nas variáveis  $y_{2s}$  e  $r_{2s}$ , obtendo-se a seguinte formulação do despacho hidrotérmico:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J c_j g_{2j} + \delta r_2^1 + \left( \delta + \frac{\mu}{\alpha} \right) r_2^2. \quad (10)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^I \eta_i U_{2i} + \sum_{j=1}^J g_{2j} + r_2 = d_2, \quad (11)$$

$$r_2^1 \leq b \quad (12)$$

$$r_2 = r_2^1 + r_2^2 \quad (13)$$

Observa-se que existem dois níveis de penalização do déficit de energia. Enquanto o déficit for menor que  $b$ , a penalização do déficit é  $\delta$ , sendo um déficit superior a  $b$ , ou seja, a variável  $r_2^2$ , o valor penalizado é dado por  $(\delta + \frac{\mu}{\alpha})$ . Estes dois níveis de penalização podem ser interpretados como uma função de penalização do déficit com dois patamares, onde o primeiro representa o custo econômico de se cortar qualquer consumo de energia, estando relacionado a restrição de valor esperado do déficit de energia, e o segundo a restrição de  $CVaR$  no déficit de energia. A Figura 2 ilustra este conceito.

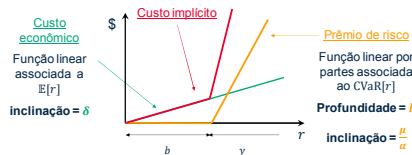


Fig. 1. Relação entre função de penalização do déficit e  $CVaR$

Desta maneira, um aspecto muito interessante das restrições de  $CVaR$  é que o custo de déficit implícito que induziria o atendimento das restrições de confiabilidade no cálculo da política operativa é uma função linear por partes. Isto significa que é possível construir uma função de penalização do déficit que mapeia de maneira analítica, e exata, a aversão a risco dos consumidores, através da superposição dos custos de déficit implícitos de cada restrição de risco. Suponha, por exemplo, que a aversão a risco dos consumidores é caracterizada por três restrições: (i)  $R_1$ : o valor esperado da energia não suprida deve ser inferior a 2% da demanda; (ii)  $R_2$ : o valor esperado da energia não suprida nos 2% piores déficits deve ser inferior a 1% da demanda ( $CVaR2\% < 1\%$ ); e (iii)  $R_3$ : o valor esperado da energia não suprida no 1% pior déficit deve ser inferior a 0,3% da demanda ( $CVaR2\% < 0,3\%$ ).

A primeira restrição corresponderá a uma função linear com origem em zero e inclinação  $\varphi_1$  (por exemplo,  $\varphi_1 = 1.200 R\$/MWh$ ). Por sua vez, a segunda restrição corresponderá a uma função linear com origem em uma determinada profundidade de déficit  $b_1$  (por exemplo, igual a 4% da demanda) e inclinação  $\varphi_2$  maior do que  $\varphi_1$  (por exemplo,  $\varphi_2 = 2.700 R\$/MWh$ ). Finalmente, a terceira restrição corresponderá a uma função linear com origem em um nível de déficit mais profundo  $b_2$  e maior inclinação do que a anterior (por exemplo, igual a 9% da demanda e  $\varphi_3 = 3.400 R\$/MWh$ ).

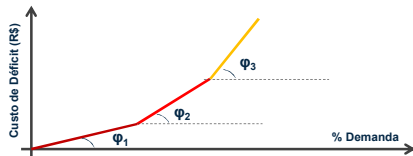


Fig. 2. Função de penalização do déficit com três patamares

### III. METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DOS SEGMENTOS DA FUNÇÃO DE PENALIZAÇÃO DO DÉFICIT

#### A. Visão geral

Conforme visto anteriormente, é possível calcular os

segmentos da Função de Penalização do Déficit (FPD) com o objetivo de garantir o atendimento a um critério de suprimento baseado na métrica de risco  $CVaR$  do déficit de energia. Nesta abordagem o custo da ocorrência de qualquer déficit de energia, que corresponde ao primeiro segmento, poderia vir dos estudos econômicos (e.g. metodologia atual 0, Equilíbrio Geral Computável 0) o qual denominaremos Custo de Déficit (CD). Os demais segmentos seriam calculados para o atendimento ao critério de suprimento, formando assim a FPD.

A questão que surge é qual o nível de aversão ao risco considerar para definição dos outros  $n$  patamares da função de custo de déficit. Para responder esta questão é necessário analisar o impacto causado pela alteração na aversão ao risco do sistema nos diferentes elos da cadeia. Por exemplo, ao aumentar o nível de confiabilidade na operação, através de um aumento no valor do segundo patamar do custo de déficit, haverá um maior despacho preventivo das termelétricas, resultando em maior custo operativo. Para manter a expansão ótima do sistema, ou seja, o valor esperado do CMO igual ao CME, será necessário ampliar a expansão do sistema, aumentando o custo de investimento. Por outro lado, a frequência com que o sistema incorrerá na necessidade de declaração de um racionamento irá reduzir, o que implica em uma redução do custo econômico do déficit de energia para o país e sociedade.

O núcleo da metodologia consiste em definir uma FPD que represente simultaneamente o critério de suprimento do sistema, os custos de operação e o impacto econômico do corte de carga à economia do país. Como calcular uma FPD para diferentes critérios de suprimento é equivalente a calcular o critério de suprimento implícito em cada função de custo de déficit candidata, a metodologia proposta consiste em construir uma curva que relaciona o custo total para o sistema, resultante da operação com uma FPD candidata, com o critério de suprimento. Apresenta-se a seguir um resumo do procedimento proposto:

1. Para determinada configuração e  $FPD = FCDEF$  econômica, simule o sistema considerando 15 anos de horizonte onde os 5 primeiros anos são para a perda das condições iniciais de armazenamento, os 5 anos intermediários são para captação dos resultados e os últimos 5 anos para esvaziamento dos reservatórios. Esta simulação é denominada de Simulação Mestra.
2. Determine o primeiro segmento da função de custo de déficit com base no estudo econômico;
3. Determine uma família de  $M$  candidatas para o prêmio de risco do primeiro segmento  $\{\mu_1; \mu_2; \dots; \mu_n; \dots; \mu_N\}$
4. Faça  $m = 1$ ;
5. Determine uma família de  $N$  candidatas para o prêmio de risco do segundo segmento  $\{\eta_1; \eta_2; \dots; \eta_n; \dots; \eta_N\}$
6. Faça  $n = 1$ ;
7. Simule o sistema e calcule o nível de confiabilidade implícito ( $CVaR$  no déficit de energia) lendo os volumes iniciais da Simulação Mestra a partir do ano 5.
8. Simule a operação do sistema com o modelo de despacho hidrotérmico e calcule o valor esperado do custo operativo  $E[COP]_n$  e o valor esperado do custo do

déficit  $E[\varphi(Rac)]_n$ ;

9. Calcule o custo total  $CT_n = E[COP]_n + E[\varphi(Rac)]_n$ ;

10. Faça  $n = n + 1$ . Se  $n > N$ , faça  $m = m + 1$ . Caso contrário volte para a etapa 4. Se  $m > M$ , pare.

O produto final da metodologia é uma fronteira eficiente, que relaciona o critério de suprimento com o custo total do sistema (operação, investimento e custo de racionamento). De maneira a atender os princípios da reprodutibilidade, previsibilidade e robustez que se deseja da base de dados utilizada no processo, propõe-se que os cálculos sejam feitos com a mesma configuração estática utilizada para o cálculo da GF dos empreendimentos de geração.

#### B. Função penalização do déficit e o custo do déficit

Uma etapa importante da metodologia proposta consiste em calcular o custo do racionamento para a sociedade. Uma primeira abordagem para calcular este custo seria multiplicar os montantes déficit de energia diretamente pela função de penalização do custo de déficit utilizada no despacho hidrotérmico. No entanto, como discutido anteriormente, os patamares desta função foram calculados de maneira a penalizar o despacho hidrotérmico e atender ao critério de suprimento. Como consequência, a FPD não está diretamente relacionada com o custo econômico de racionar energia da sociedade.

Propõe-se neste trabalho utilizar na valoração do custo do racionamento para a sociedade a função de custo de déficit obtida dos estudos econômicos. Esta função pode ser distinta da utilizada para a operação do despacho hidrotérmico.

Por exemplo, função de custo de déficit econômico pode possuir 4 patamares, calculados de acordo com a Matriz Insumo-Produto, enquanto a função utilizada para o despacho hidrotérmico pode possuir dois patamares. Em outras palavras, a função de dois patamares seria utilizada nos modelos de despacho hidrotérmico para as decisões operativas e a função econômica de 4 patamares seria utilizada para quantificar os custos para a sociedade de um racionamento de energia resultante desta operação.

Seja a função de custo de déficit econômico  $\varphi(Rac)$ , onde  $Rac$  é a variável aleatória referente ao montante a ser racionado durante o período seco. O valor esperado do custo do racionamento para a sociedade é definido como  $E[\varphi(Rac)]$ .

### IV. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado com a configuração estática utilizada para o cálculo da GF dos empreendimentos do leilão de energia nova A-5 de 2015, ajustada para CMO igual a CME de 193 R\$/MWh. Os resultados a serem apresentados foram realizados com simulações do despacho hidrotérmico utilizando o software SDDP, desenvolvido pela PSR, inicialmente sem incorporar o  $CVaR$  no custo operativo e posteriormente incorporando mais essa aversão ao risco. Afim de verificar a variação da metodologia em sistemas com suprimento mais restrito e com diferentes configurações de cenários de geração, simulou-se três configurações distintas de geração e demanda: Caso Base (**BASE**), Caso Demanda 5% maior (**ALTA**) e Caso

Demanda 5% maior e potência instalada termelétrica 5% maior. (**TERM**)

#### A. Curva eficiente

Aplicou-se a metodologia apresentada na seção anterior considerando a função de penalização do déficit igual aos valores da função de custo de déficit econômica de 4 patamares calculada utilizando a metodologia do GCPS, atualizada pela MIP de 2010 0 no Caso Base. Os valores de cada patamar atualizados para 2015 são 518,77 R\$/MWh, 1205,85 R\$/MWh, 6526,80 R\$/MWh, 8225,78 R\$/MWh. A FPD utilizada possui dois patamares, onde o primeiro é igual ao custo econômico (518,77 R\$/MWh) e o prêmio de risco é aplicado no segundo patamar. A Figura 3 apresenta o custo total para o sistema em função do prêmio de risco no segundo patamar e o resultado obtido quando se utiliza a função de custo de déficit econômica como FPD.

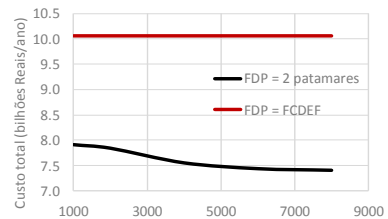


Fig. 3. Curva de custos totais x Prêmio no 2º patamar

Observa-se que o ponto de menor custo esperado para o sistema ocorre quando o prêmio de risco é igual a 8000 R\$/MWh, resultando em um segundo patamar de 9205,85 R\$/MWh. Este custo total de 7,40 bilhões R\$/ano é menor que o obtido quando o despacho hidrotérmico é simulado considerando a FPD igual ao custo econômico, de 10,06 bilhões R\$/ano.

#### B. Superfície eficiente

O valor do primeiro patamar da FCDE é inferior ao custo variável unitário de diversas termelétricas a óleo combustível e a óleo diesel, indicando que o despacho hidrotérmico abriria mão de utilizar estes equipamentos antes de cortar 5% da carga. Como o objetivo de avaliar a razoabilidade deste primeiro patamar, repetiu-se a análise anterior considerando também a aplicação de um prêmio de risco no primeiro patamar da FPD. O resultado deste procedimento é uma superfície de custos totais para o sistema para os três casos de trabalho considerando o custo de racionamento valorados pela função de custo de déficit econômica proveniente da MIP. A Figura 4 mostra um exemplo da superfície encontrada para os pares de prêmios de risco simulados.

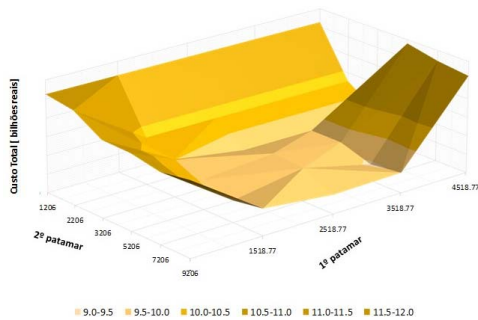


Fig. 4. Superfície de Funções de Penalização do déficit x Custo total

A Tabela 1 mostra a diferença percentual do custo total de cada caso simulado em relação ao menor custo total encontrado nas simulações de cada configuração.

Tabela 1- Diferença % dos Custos totais

Prêmio 1º Pat	Prêmio 2º Pat	4 patamares	0					1000					
			1000	2000	4000	6000	8000	1000	2000	4000	6000	8000	
BASE-GPCS			38%	8%	7%	3%	2%	1%	9%	6%	2%	0%	0%
ALTA-GPCS			37%	11%	10%	6%	5%	3%	11%	6%	4%	1%	1%
TERM-GPCS			30%	6%	5%	5%	3%	3%	4%	2%	3%	2%	3%

Prêmio 1º Pat	Prêmio 2º Pat	2000				3000			4000		
		2000	4000	6000	8000	4000	6000	8000	4000	6000	8000
BASE-GPCS		6%	3%	3%	2%	3%	2%	2%	4%	3%	3%
ALTA-GPCS		7%	4%	1%	0%	4%	1%	0%	7%	2%	2%
TERM-GPCS		3%	2%	2%	3%	0%	3%	3%	4%	0%	3%

Explicitamente, as FPD que levam ao menor custo são as em destaque formadas com o prêmio de risco de 3.000R\$/MWh e 4.000R\$/MWh no Caso Demanda Alta e 3.000R\$/MWh e 8.000R\$/MWh no Caso Demanda e Potência Alta no primeiro patamar e segundo patamar da função de custo de déficit econômica. Porém, se analisarmos qual a FPD que leva aos menores erros considerando as três configurações, indica-se a FPD considerando a função de déficit econômica formada pela MIP, o 1º patamar de 3518R\$/MWh e 2º patamar de 7.205R\$/MWh. Esta FPD se mostra mais robusta frente à incerteza da configuração hidrotérmica.

A Tabela 2 mostra o CVaR 1% do déficit para cada caso e configuração. Observa-se que a medida em que há o aumento do prêmio no primeiro patamar, CVaR do déficit decresce mais sensivelmente do que somente o aumento do prêmio no segundo patamar.

Tabela 2- CVaR 1% dos déficits – Caso Base

Prêmio 1º/2º pat	0	1000	2000	4000	6000	8000
0	6.3%	4.8%	4.7%	4.4%	4.3%	4.3%
1000		3.8%	3.6%	3.3%	3.1%	3.1%
2000			3.2%	3.0%	2.9%	2.8%
3000				2.8%	2.7%	2.6%
4000				2.7%	2.5%	2.5%

Diferentes combinações de prêmios de riscos podem levar a mesmos CVaR de déficits, como ainda na Tabela 2 pode-se verificar nos prêmios de risco de 3.000R\$/MWh e 6.000R\$/MWh no primeiro patamar e segundo patamar da função de custo de déficit econômica e 4.000R\$/MWh e 4.000R\$/MWh no primeiro patamar e segundo patamar da função de custo de déficit econômica, porém com custos distintos do EGC os prêmios 4.000R\$/MWh e 4.000R\$/MWh no primeiro patamar e segundo patamar da função de custo de

deficit econômica levam a custo totais maiores do que o custo total da função de penalização ótima.

### C. Valorando o custo de racionamento

Valorar o déficit ao valor da função de custo de déficit econômico significa que a percepção da falta de suprimento para a sociedade é diferente da percepção do custo de déficit do operador/ planejador. Considerar valores da função de penalização mais alta do que valores da função de custo de déficit econômico mostra que a aversão ao risco de suprimento da operação do sistema é alta. Porém, caso essa relação fosse diferente, operar o sistema com uma função de penalização mais baixa do que a função de custo de déficit, leva a custos elevados, podendo mudar a escolha ótima da função de penalização. Como exemplo, repetiu-se o procedimento anterior valorando os racionamentos pela função de custo de déficit econômica feita pelo equilíbrio geral computável 0 Os valores de cada patamar atualizados para 2015 são 6.378,05R\$/MWh, 8.474,42R\$/MWh, 11.814,10R\$/MWh, e 17.112,29R\$/MWh.

Como resultado, observa-se que mesmo valorando dos déficits a um valor mais alto, a função de penalização recomendada seria a mesma do exemplo anterior, 1º patamar de 3.518R\$/MWh e 2º patamar de 7.205R\$/MWh, pois ela que leva a custo total menor.

Comparando os resultados plotados na Tabela 1 e adotando a mesma premissa de mínimo custo entre as três configurações, ainda indica-se o uso dos prêmios de risco de 3.000R\$/MWh e 6.000R\$/MWh no primeiro patamar e segundo patamar da função de custo de déficit econômica. Observa-se que o custo total aumenta até 65% para os casos sem prêmio de risco no primeiro patamar enquanto para os casos com prêmio de risco de 3000 R\$/MWh no primeiro patamar o custo total aumenta até 6%. Ou seja, a adoção de um valor baixo no primeiro patamar requer um cuidado extra com a valoração do risco de racionamento já que esta componente pode elevar significativamente o os custos.

Tabela 3- Diferença % dos Custos totais – Valorado EGC

Prêmio 1º Pat	Prêmio 2º Pat	4 patamares	0					1000					
			1000	2000	4000	6000	8000	1000	2000	4000	6000	8000	
BASE-EGC			106%	39%	40%	39%	38%	38%	17%	12%	8%	5%	5%
ALTA-EGC			120%	65%	71%	64%	61%	59%	24%	18%	16%	12%	10%
TERM-EGC			95%	47%	46%	51%	42%	44%	12%	7%	10%	8%	11%

Prêmio 1º Pat	Prêmio 2º Pat	2000				3000			4000		
		2000	4000	6000	8000	4000	6000	8000	4000	6000	8000
BASE-EGC		9%	4%	3%	3%	2%	1%	1%	2%	0%	0%
ALTA-EGC		13%	8%	4%	3%	6%	2%	0%	8%	2%	1%
TERM-EGC		8%	5%	5%	6%	1%	4%	5%	5%	0%	4%

### D. Inserindo o CVaR – Custo nas simulações

Os resultados mostrados nas sessões anteriores não consideravam o CVaR-Custo nas simulações 0000. Esta sessão tem como objetivo avaliar o impacto da inserção de mais um mecanismo de aversão ao risco na escolha da função de penalização ótima que leva a um custo total mínimo. Os valores vigentes para os parâmetros de  $\alpha$  e  $\lambda$  são 50% e 40% respectivamente. Para isso, aplicou-se a metodologia descrita anteriormente somente no Caso Base com a consideração do

CVaR-Custo. A inserção do CVaR-Custo tem menor impacto no aumento do custo operativo das simulações e grande impacto na redução do custo de racionamento, causando uma redução de custos totais em todos os casos com a presença do CVaR-Custo. Destaca-se que a escolha de uma FPD juntamente com o mecanismo de aversão ao risco CVaR-Custo inclui um processo cíclico onde uma vez para definição de qual o melhor parâmetro de CVaR-Custo a ser utilizado, dentro das simulações de busca foi utilizada uma FPD no modelo.

Analisando a Tabela 4, observa-se que a FPD com racionamentos valorados a Metodologia MIP ou EGC escolhida seria a prêmios de risco de 4.000R\$/MWh e 6.000R\$/MWh no primeiro patamar e segundo patamar da função de custo de déficit econômica. Porém, não se observa grandes discrepâncias de custo para a FPD previamente definida, podendo dessa forma, ainda indicar mesmo com a presença do CVaR – Custo a FPD com prêmios de risco de 3.000R\$/MWh e 6.000R\$/MWh.

Tabela 4- Comparação Caso Base com x sem CVaR- Custo

Prêmio 1ºPat	Prêmio 2ºPat	4 patamares	0					1000				
			1000	2000	4000	6000	8000	1000	2000	4000	6000	8000
BASE-GPCS		38%	8%	7%	3%	2%	1%	9%	6%	2%	0%	0%
BASE-GPCS CVAR		24%	20%	14%	7%	5%	3%	14%	11%	4%	2%	1%
BASE-EGC CVAR		94%	91%	83%	71%	66%	64%	28%	24%	16%	13%	10%

Prêmio 1ºPat	Prêmio 2ºPat	2000				3000				4000			
		2000	4000	6000	8000	4000	6000	8000	4000	6000	8000		
BASE-GPCS		6%	3%	3%	2%	3%	2%	2%	4%	3%	3%		
BASE-GPCS CVAR		10%	3%	1%	0%	4%	1%	3%	3%	2%	6%		
BASE-EGC CVAR		17%	7%	5%	3%	5%	2%	3%	2%	0%	4%		

## V. CONCLUSÕES

Observou-se que não é necessário que o primeiro patamar da função de penalização do déficit seja igual ao primeiro patamar da função de déficit econômica. Isso quer dizer que é importante analisar o prêmio de risco do primeiro patamar da função de penalização. A consideração desse prêmio de risco pode levar a custos totais menores, além de ser relevante para redução de déficits.

A inserção do CVaR-Custo nas simulações reduziu o custo total, mostrando que, mesmo que haja um aumento do custo operativo, a redução no custo de racionamento compensa a operação com o CVaR. Outro fator importante é que as simulações mostraram que inserir dois mecanismos de aversão ao risco não levou a outra função de penalização ótima. Aumentar os prêmios de risco no primeiro patamar acima de 4.000R\$/MWh, não traz ganhos significativos na segurança de suprimento do sistema, além de elevar os custos totais. Considerando a FCDE do GCPS, o mínimo custo total ocorre com 1ºpatamar de 3.518 R\$/MWh e 2ºpatamar 7.205 R\$/MWh. Este resultado é obtido mesmo que se valore os déficits pelo EGC. Os resultados indicam a necessidade de prêmio negativo no 1º patamar da FPD se tomada como referência a FCDE do EGC.

## VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado do P&D ANEEL Estratégico e cooperativo nº PD-0642-002/2015 – “Metodologia de Elaboração da Função de Custo de Déficit”. Agradecemos a

todas as empresas cooperadas, à Enercan, à Apine, às empresas executoras Thymos e FGV.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LOUREIRO, P.G.C, “Custo Marginal do Déficit de Energia Elétrica: Histórico, avaliação e proposta de uma nova metodologia”, dissertação de mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.
- Da Costa Jr, “Representação de restrições de aversão a risco de CVaR em Programação Dinâmica Dual Estocástica com aplicação ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos”, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2013.
- ACERBI, C., TASCHE, D. Expected Shortfall: a natural coherent alternative to Value at Risk”, arXiv, May 2001.
- ROCKAFELLAR, R. T., URYASEV, S., \Optimization of Conditional Value-at-Risk”, Journal of Risk, v. 2, pp. 21 {41, 2000.
- DINIZ, A.L., TCHEOU, M.P., MACIEIRA, M.E.P. Uma Abordagem Direta para Consideração do CVaR no Problema de Planejamento da Operação Hidrotérmica. XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro-RJ, maio de 2012.
- COSTA, J.P., SHAPIRO, A., TEKAYA, W. Multistage energy planning - risk neutral and risk averse approaches. XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro-RJ, maio de 2012.
- MATOS, V.L., FINARDI, E.C., LARROYD, P.V. Uma Medida Coerente de Risco como Métrica para o Planejamento Anual da Operação Energética. XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro-RJ, maio de 2012.
- A. L. Diniz and M. E. P. Maceira, "A four-dimensional model of hydro generation for the short-term hydrothermal dispatch problem considering head and spillage effects", IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, pp. 1298-1308, 2008
- M.V.F. Pereira and L.M.V.G. Pinto, “Stochastic Optimization of Multireservoir Hydroelectric System – a Decomposition Approach”, Water Resource Research, Vol 21 No 6, 1985.
- GUIMARAES, A. R. ; PEREIRA, M. V. ; ROSENBLATT, J. ; BARROSO, L. A. ; FARIA, E. T. ; KELMAN, R. . Estratégia de Contratação das Distribuidoras sob Incerteza de Demanda em Leilões de Energia. In: XVII SNTPEE, 2005, Curitiba. XVII SNTPEE, 2005.
- Handbook of Computable General Equilibrium Modeling, Volume 1, Pages 1-1841 (2013). Handbook of Computable General Equilibrium Modeling SET, Vols. 1A and 1B. Edited by Peter B. Dixon and Dale W. Jorgensen.
- GCPS. “Comissão para estudo do custo do deficit – Relatório Final”, Rio de Janeiro, 1988