

METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS METAS PARA AS FUTURAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Carlos Alberto de Araújo Júnior

PUC-Rio/ONS

Rua da Quitanda, 196 – Centro, Rio de Janeiro

carlos.junior@ons.org.br

Maria Cândida Abib Lima

ONS

Rua da Quitanda, 196 – Centro, Rio de Janeiro

candida@ons.org.br

Alexandre Street de Aguiar

PUC-Rio

Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro

street@ele.puc-rio.br

RESUMO

Com a perspectiva da entrada em operação na região Amazônica de usinas de grande porte quanto à capacidade de geração e pequena capacidade de regularização, tem-se a perspectiva de mudanças no atual perfil de operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) em função da região Amazônica possuir um forte ciclo sazonal e baixa complementariedade com as demais regiões do Brasil. Com isto, a metodologia atualmente utilizada, que minimiza o valor esperado do custo total de operação, tende a elevar a probabilidade dos reservatórios do subsistema Sudeste atingirem níveis baixos no fim do período seco, supondo que com a importação de energia da região Amazônica no período úmido o armazenamento, em média, possa ser recuperado. Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma modelagem utilizando métodos de apoio multicritério à decisão, para definição dos níveis metas de forma a minimizar o valor esperado do custo, dado que se garanta a segurança energética.

PALAVRAS CHAVE. Métodos de Apoio à Decisão; Segurança Energética; Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos.

ABSTRACT

With the prospect of entry in operation in the Amazon region of new large plants with high generation capacity but low inflows regularization capacity, methodological changes in the energy planning operations of Brazilian National Interconnected System are expected due to Amazon's region strong seasonal cycle and low complementarity with other regions of Brazil. This way, the current methodology, which minimizes the expected value of the total operations cost, tends to raise the probability of the drawdown of the Southeast subsystem reservoirs reaching low levels at the end of the dry season, with the assumption that the reservoirs, on average, will be recovered by the energy imported from Amazon. This work proposes the development of a model using multicriteria decision support methods to define the minimum level of storage of the Southeast subsystem to minimize the expected value of cost, provided that it guarantees the energy security.

KEYWORDS. Decision Support Methods; Energy Security; Operation Planning of Hydrothermal Systems.

1. Introdução

Com a perspectiva da entrada em operação na região Amazônica de usinas de grande porte quanto à capacidade de geração e pequena capacidade de regularização, tem-se a perspectiva de mudanças no atual perfil de operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) em função da região Amazônica possuir um ciclo sazonal bem definido, com alta afluência no período úmido e baixa no período seco [EPE (2011)]. Com vistas a melhor utilizar esta característica hidrológica, a metodologia atual, que minimiza o valor esperado do custo total de operação (custo de geração termoelétrica mais penalidade por não suprimento da demanda), tende a elevar a probabilidade dos reservatórios do subsistema Sudeste atingirem níveis baixos no fim do período seco. Isso porque o modelo supõe que o armazenamento do subsistema Sudeste será recuperado, em média, com a importação de energia da região Amazônica no período úmido. Há, portanto, dependência de transmissão de intenso fluxo de energia proveniente da região Amazônica neste período e o deplecionamento a níveis mínimos dos reservatórios do subsistema Sudeste pode significar um risco de atendimento à demanda energética caso venha a se configurar um cenário desfavorável. Isto leva à necessidade de ajustes de metodologias e critérios de operação, de forma a garantir a segurança energética com economicidade.

Atualmente os níveis metas estabelecidos para os subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste são determinados através de cálculo recursivo utilizando a metodologia da Curva de Aversão a Risco (CAR) [ONS (2010)] [ONS (2011)], contudo, com a nova configuração do SIN, a determinação dos níveis metas com a metodologia atual pode vir se tornar difícil devido à: dificuldade no estabelecimento da série hidrológica crítica; dificuldade em estabelecer premissas de intercâmbio, o que pode ser agravado com a perspectiva de aumento do número de subsistemas nos estudos de planejamento do SIN; necessidade de tratamento de outras condicionantes que não são consideradas na metodologia atual, tais como o custo para alcançar os níveis metas.

No presente trabalho apresenta-se a proposta de desenvolvimento de uma modelagem para definição dos níveis mínimos de armazenamento ao final do período seco utilizando metodologia de apoio multicritério à decisão, que captura as preferências dos decisores, visando auxiliar o operador nos estudos de planejamento da operação energética frente à nova configuração do SIN e contornar as possíveis dificuldades apontadas em determinar os níveis metas utilizando a metodologia atual.

O presente trabalho está organizado em 6 seções, iniciados por esta introdução que contém a motivação, objetivo e organização do trabalho. A seção 2 descreve as principais características da operação do SIN frente à nova configuração, ou seja, após a entrada de usinas a fio d'água de grande porte na região Amazônica. A seção 3 descreve a metodologia proposta para especificação, construção e calibração do sistema de apoio à decisão que será utilizado para a definição dos níveis mínimos de armazenamento ao final do período seco. A seção 4 apresenta os resultados da simulação de aplicação da metodologia proposta em dados reais do planejamento da operação do SIN. A seção 5 apresenta uma análise de sensibilidade. Por fim, a seção 6 corresponde às conclusões e trabalhos futuros.

2. Operação do SIN Frente à Entrada de Usinas a Fio D'água de Grande Porte na Região Amazônica

A região Amazônica possui uma forte sazonalidade, ou seja, um ciclo sazonal bem definido, com alta afluência no período úmido e baixa no período seco e forte simultaneidade com o regime hidrológico do subsistema Sudeste [EPE (2011)]. A Figura 1 apresenta uma comparação da energia afluenta média entre a região Amazônica, representada pelos subsistemas Acre Rondônia, Teles Pires e Belo Monte, e o subsistema Sudeste, considerando a bacia do Paraná.

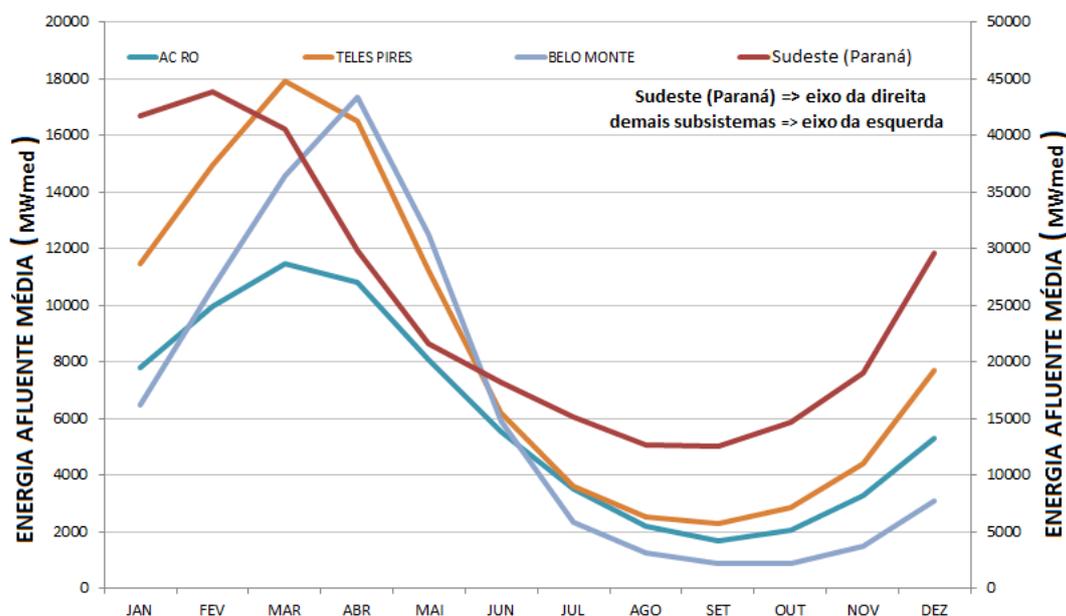


Figura 1: Energia Afluente Média [EPE (2011)]

Devido à forte sazonalidade, as novas usinas da região Amazônica, que têm como característica uma alta capacidade de geração e baixa de regularização, serão capazes de gerar uma grande quantidade de energia no período úmido, e uma baixa quantidade no período seco. Com vistas a melhor utilizar esta característica hidrológica, a metodologia atual, que minimiza o valor esperado do custo total de operação (custo de geração termoeletrica mais penalidade por não suprimento da demanda), levará as novas usinas da região Amazônica a gerarem o máximo no período úmido, reduzindo a geração de usinas que tenham capacidade de armazenar água, para que no período seco esta água seja usada para gerar energia enquanto as novas usinas da região Amazônica não serão capazes de gerar grande quantidade de energia.

O subsistema que possui os maiores reservatórios de acumulação, e que será capaz de armazenar água durante o período úmido para gerar no período seco é o subsistema Sudeste. Pode-se destacar a importância dos grandes reservatórios instalados nesta região, que representam 71% do SIN [EPE (2011)]. A metodologia atual levará o subsistema Sudeste ao deplecionamento dos seus reservatórios, atingindo níveis mínimos no fim do período seco, supondo que com a importação de energia da região Amazônica no período úmido o armazenamento destes reservatórios, em média, possa ser recuperado. Isto pode ser observado na Figura 2, que mostra o percentual de séries que levam o armazenamento do subsistema Sudeste a valores abaixo de 10% da capacidade de armazenamento ao longo do horizonte de estudo e a motorização das novas usinas da região Amazônica. Observa-se que, com a motorização das novas usinas há um aumento significativo no número de séries que levam o armazenamento do subsistema Sudeste a valores abaixo de 10% da capacidade de armazenamento, pulando do patamar de aproximadamente 2% no início do estudo para quase 20% no final do estudo.

3. Metodologia Proposta para a Determinação dos Níveis Metas

A metodologia proposta tem como objetivo definir os níveis metas (níveis mínimos de armazenamento ao final do período seco - final de mês de novembro) através da avaliação de diversas alternativas de possibilidades de armazenamento para os subsistemas Sudeste e Nordeste. Os níveis de armazenamento serão definidos através de um sistema de apoio à decisão com base na segurança energética e economicidade.

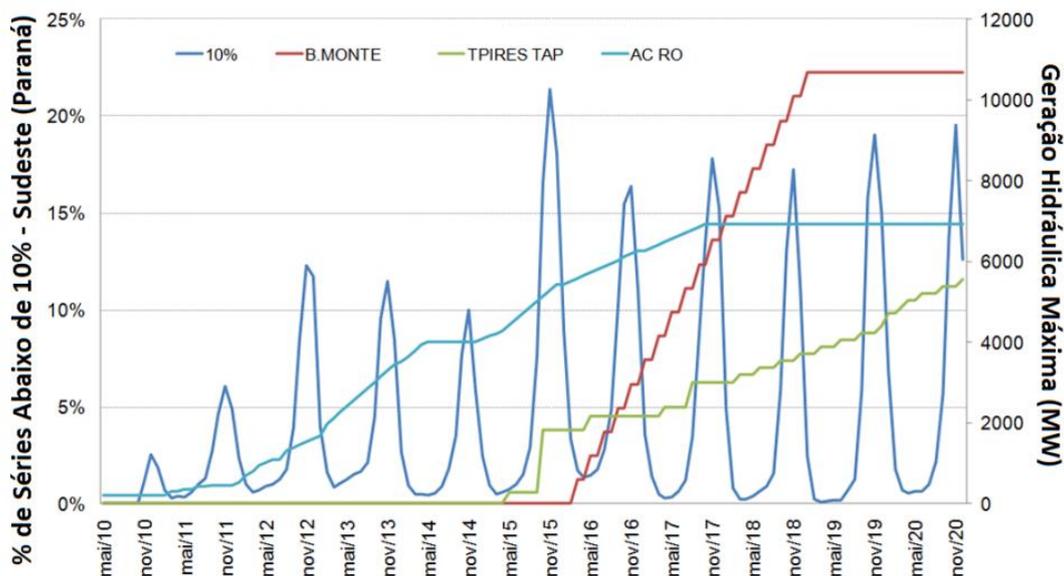


Figura 2: Percentual de Séries Abaixo de 10% do Armazenamento e Motorização das Novas Usinas da Região Amazônica

Neste trabalho, a segurança energética será abordada através da definição dos níveis mínimos de armazenamento ao final da estação seca que garantam o atendimento até o ano seguinte, considerando a redução da capacidade de regularização e o risco hidrológico. A economicidade será abordada através do custo de geração térmica requerido para alcançar o grau de segurança desejado.

Sendo assim, a segurança energética será aferida pelo risco de déficit e percentual de séries que levam a armazenamentos abaixo de 20% no ano seguinte (segundo ano do estudo, ano que os níveis metas visam proteger) e a economicidade pelo custo de geração térmica necessária para que os níveis metas sejam atingidos (primeiro ano de estudo).

3.1. Definição do Método

O método escolhido foi o PROMETHEE II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) [Brans (1985)], devido a: permitir que as alternativas sejam avaliadas diferentemente por cada critério, através dos limiares de preferência e indiferença utilizados nas funções de preferência relativa, Figura 3. O que é importante, neste trabalho, na avaliação das alternativas em relação ao custo e segurança. Visto que pequenas variações de risco de déficit (segurança) devem ser levadas em consideração, enquanto pequenas variações de custo podem ser desprezadas. Assim, é fundamental a escolha de um método que seja capaz de tratar de forma diferenciada a avaliação das alternativas em relação a cada critério; permitir a ordenação total das alternativas, diferentemente do método PROMETHEE I que fornece um subconjunto de alternativas não dominadas, dado que para a operação do SIN é necessária a definição de uma única alternativa de armazenamento; e os conceitos e parâmetros envolvidos em sua aplicação podem ser assimilados facilmente pelo decisor, já que fazem parte da sua área de atuação.

O método PROMETHEE II [Brans (1985)] [Brans (1988)] [GOMES (2002)] [Belton(2003)] [Mareschal (1988)] tem como objetivo obter uma ordem das alternativas. Para isso, calcula a preferência com base na diferença δ_{ik} para cada par de alternativas “i” e “k” em relação a cada critério “j”.

Para expressar o grau de intensidade da preferência de uma alternativa em relação à outra, o método faz uso de seis funções de preferência relativa [GOMES (2004)]. A Figura 3 apresenta estas funções, onde o limiar de preferência e indiferença são representados, respectivamente por “p” e “q”.

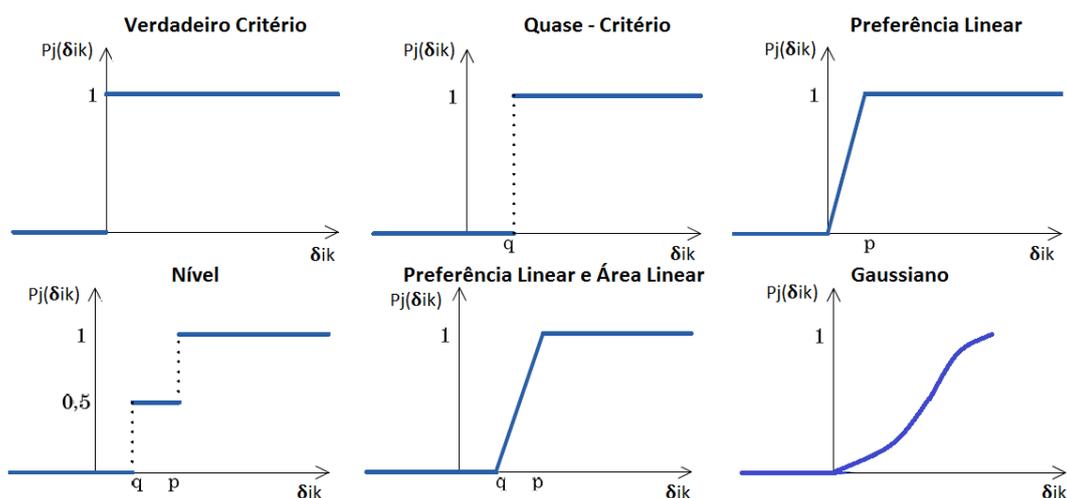


Figura 3: Funções de Preferência Relativa [Belton (2003)]

Para cada critério é definido uma função de preferência e os limiares de preferência e indiferença. Depois de calculado a preferência de uma alternativa em relação à outra para cada par de alternativas em relação a cada critério é calculado o índice geral da preferência:

$$S_{ik} = \frac{\sum_j W_j P_j(\delta_{ik})}{\sum_j W_j}$$

Onde:

W_j = peso do critério “j”;

P_j = função de preferência relativa do critério “j”;

δ_{ik} = diferença entre a alternativa “i” e “k”.

Em seguida, são calculados os fluxos de superação positivos ϕ_i^+ e negativos ϕ_i^- relativos à alternativa “i”. Estes fluxos têm como objetivo expressar como cada alternativa (i) supera e é superada pelas demais alternativas K_n , sendo “m” o número total de alternativas:

$$\phi_i^+ = \sum_{n=1}^{m-1} S_{ik_n} \quad \phi_i^- = \sum_{n=1}^{m-1} S_{K_n i}$$

Em seguida calcula-se o fluxo de superação total, que consiste na diferença entre os fluxos de superação positivos ϕ_i^+ e negativos ϕ_i^- relativos à alternativa “i”:

$$\phi_i = \phi_i^+ - \phi_i^-$$

Após os cálculos, as alternativas são ordenadas da mais eficiente (maior fluxo total) a menos eficiente (menor fluxo total).

3.2. Definição dos Critérios

Este é um importante ponto a ser tratado no desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão, e deve envolver especialistas das áreas relacionadas ao problema para que sejam escolhidos os mais relevantes. Neste trabalho, de forma ilustrativa, serão utilizados dois grupos de critérios: os relacionados à segurança energética (percentual de risco de déficit e percentual de séries que levam o armazenamento abaixo de 20%, para cada subsistema) e a economicidade (custo de geração térmica total para atingir os níveis metas, ou seja, soma dos custos da geração térmica dos subsistemas Sudeste, Sul, Nordeste e Norte).

3.3. Definição das Funções de Preferência de Cada Critério

No método PROMETHEE II, as alternativas são comparadas entre si, em relação a cada critério (j), com o uso de funções de preferência (P_j) que, a partir da verificação da diferença entre as avaliações de duas alternativas (δ_{ik}), estabelecem um grau de preferência de uma em relação à outra ($P_j(\delta_{ik})$).

O processo de escolha da função de preferência tem o objetivo de capturar o conhecimento tácito dos decisores e pode ser alterado por estes. Neste trabalho, de forma ilustrativa, para o critério de percentual de risco de déficit foi utilizada a função de preferência linear e para os critérios de percentual de séries que levam a armazenamentos abaixo de 20% e custo para atingir os níveis metas foi utilizada a função preferência linear e área linear.

A escolha da função de preferência linear para o critério de percentual de risco de déficit foi devido ao fato de que pequenas variações neste percentual são importantes. Já para os critérios de percentual de séries abaixo de 20% e custo para atingir os níveis metas foi escolhida a função preferência linear e área linear, porque pequenas diferenças podem ser desconsideradas.

A Figura 4 apresenta as três funções de preferência utilizadas neste trabalho. Para o critério relacionado ao risco, o limiar de preferência (p) considerado foi 1 (valor absoluto). Para o critério relacionado ao percentual de séries abaixo de 20%, o limiar de indiferença (q) considerado foi de 0,5 (valor absoluto), e o limiar de preferência (p) de 3 (valor absoluto). Para o critério relacionado ao custo, o limiar de indiferença (q) considerado foi de 0,5% do custo, e o limiar de preferência (p) de 3% do custo.

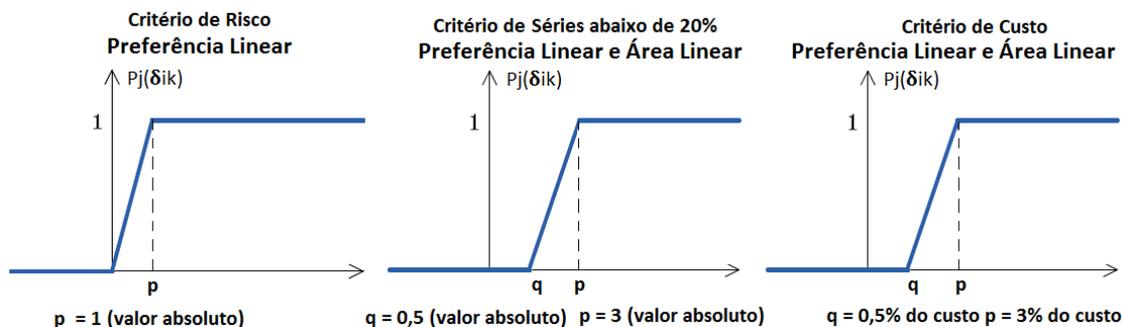


Figura 4: Funções de Preferências Utilizadas

3.4. Definição dos Pesos

A escolha dos pesos de cada critério (W_j) deve ser feita em conjunto com os decisores, que poderão atribuir com mais realismo a importância de cada critério e capturar informações conjunturais não quantitativas.

Neste trabalho, de forma ilustrativa, foi considerado um total de 14 pesos. A segurança energética foi considerada mais importante que a economicidade, desta forma, os critérios relacionados à segurança energética totalizam 8 pesos, 57.14% do total e o critério relacionado a economicidade totaliza 6 pesos, 42.86% do total.

Os grupos de critérios relacionados à segurança, risco de déficit e percentual de séries que levam o armazenamento a valores abaixo de 20% foram considerados de mesma importância, então os pesos correspondentes a segurança foram divididos igualmente entre os dois grupos de critérios, 4 pesos correspondendo a 28.57% para cada um.

Para o grupo de critérios relacionado ao risco de déficit, os pesos foram divididos igualmente para cada subsistema, Sudeste, Sul, Nordeste e Norte, 1 peso, representando 7.14% do total. Foram definidos pesos iguais em função do percentual de risco de déficit ser igualmente importante nestes quatro subsistemas.

Para o grupo de critérios relacionados ao percentual de séries abaixo de 20% foi atribuído maior valor para o subsistema Sudeste, com peso igual a 2, correspondendo a 14.29% do total, devido à maior capacidade de armazenamento deste subsistema. Para o subsistema

Nordeste foi atribuído peso de valor 1 que corresponde a 7.14% do total, devido a ser o segundo maior subsistema e para os subsistemas Sul e Norte pesos de valor igual a 0.5% correspondendo a 3.57% do total.

Em relação ao critério custo, foi atribuído peso de valor 6, que corresponde a 42.86% do total, correspondente ao valor total da geração térmica dos quatro subsistemas reunidos em um único critério. Este critério não foi analisado de forma individual para cada subsistema por ser indiferente gerar térmica em um ou outro subsistema, em função do sistema ser interligado. Os valores percentuais dos pesos utilizados neste trabalho são apresentados na Figura 5.

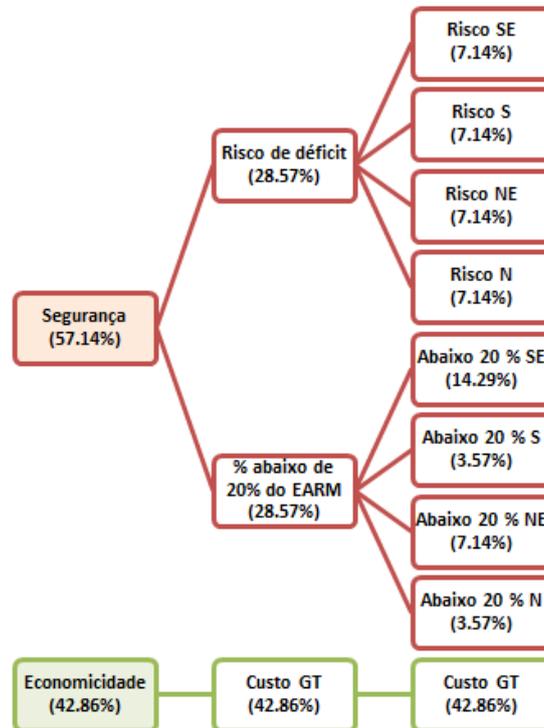


Figura 5: Valores Percentuais dos Pesos

3.5. Definição do Grid de Alternativas

As alternativas (i) são definidas pela experiência dos decisores, que optam pelas combinações de armazenamentos para os subsistemas Sudeste e Nordeste que serão avaliadas.

Neste trabalho, foram adotadas combinações de armazenamento dos subsistemas Sudeste e Nordeste partindo do armazenamento mínimo de 20%, variando de 5 em 5 por cento, até o armazenamento máximo de 50%.

Para cada possível alternativa, o modelo NEWAVE [CEPEL (2012)] é utilizado para avaliar a alternativa segundo os critérios escolhidos. De posse das avaliações de cada alternativa, a melhor é escolhida usando o método PROMETHEE II. Depois de encontrada a solução, é realizada uma segunda etapa, com o objetivo de refinar a solução encontrada, através do estabelecimento de um novo grid de alternativas em torno da solução, variando de 1 em 1 por cento até 2% para mais e menos do valor encontrado como solução.

Com estes dois passos, é possível cobrir todas as combinações de armazenamentos de 1 em 1 por cento na faixa que vai de 18 a 52 por cento.

3.6. Cálculo dos Valores Correspondentes aos Critérios de Percentual de Risco e Percentual de Séries com Armazenamento Inferior a 20%

O objetivo desta etapa é avaliar as consequências futuras de cada combinação de armazenamento mínimo definida no grid de alternativas.

Para cada alternativa do grid, com o auxílio do modelo NEWAVE utilizando séries sintéticas, são obtidos os dados referentes aos critérios relacionados à segurança energética (percentual de risco de déficit e percentual de séries com armazenamento inferior a 20%) da seguinte forma: executar a simulação final a partir de dezembro do ano para o qual se quer definir os níveis metas, utilizando a estratégia de operação relativa ao PMO de referência; o armazenamento inicial é o par correspondente à alternativa a ser avaliada para os subsistemas para os quais se quer definir os níveis metas. Para os demais subsistemas considerar o valor médio de armazenamento das 2000 séries sintéticas; obter o percentual de risco de déficit e percentual de séries que levam a armazenamentos inferiores a 20% ao longo do ano seguinte, para cada alternativa.

3.7. Cálculo dos Valores Correspondentes ao Critério de Custo de Geração Térmica

O objetivo desta etapa é avaliar o custo de geração térmica necessário para se atingir os níveis de cada combinação de armazenamento mínimo definidas no grid de alternativa.

Para cada alternativa do grid, com o auxílio do modelo NEWAVE utilizando séries sintéticas, são obtidos os dados referentes ao critério relacionado à economicidade (custo de geração térmica), da seguinte forma: executar uma política operativa a partir do início do PMO de referência até o final do ano seguinte, sem anos adicionais e com armazenamentos fixos no final do período seco do ano seguinte, sendo esses os valores definidos para cada alternativa, para os subsistemas para os quais se deseja definir os níveis metas; obter o custo de geração térmica de cada alternativa.

4. Resultados da Simulação de Aplicação da Metodologia Proposta

A metodologia foi aplicada no cálculo dos níveis metas para o ano de 2012, que tem como caso base o Programa Mensal de Operação (PMO) de dezembro de 2011. As simulações do sistema de apoio à decisão foram realizadas utilizando o software Visual Promethee [Promethee (2012)].

A Tabela 1 apresenta, resumidamente, as variáveis observadas, onde as alternativas são representadas pelos pares de energia armazenada (EARM) dos subsistemas Sudeste (SE) e Nordeste (NE) respectivamente. As consequências dos níveis mínimos de armazenamento de cada alternativa (risco de déficit e percentual de séries que levam o armazenamento a valores inferiores a 20%) são calculados para o ano de 2013 e estão representados para os subsistemas Sudeste, Sul, Nordeste e Norte individualmente. Os valores de custo da geração térmica necessária para atingir os níveis metas especificados são calculados para o ano de 2012 e estão representando o valor de geração térmica total dos subsistemas Sudeste, Sul, Nordeste e Norte.

A Figura 6 apresenta os pesos, estabelecidos de forma ilustrativa pelos decisores, para o sistema de apoio à decisão. Os critérios referentes à segurança (risco de déficit e percentual de séries que levam o armazenamento abaixo de 20%) são representados pelo grupo de cor vermelha e o critério referente à economicidade (custo de geração térmica) pelo grupo de cor verde. A Figura mostra também as funções de preferências e os seus respectivos limiares de preferência e indiferença estabelecidos para cada critério. Estes dados expressam, de forma ilustrativa, as preferências dos decisores em relação aos critérios selecionados para a definição dos níveis metas.

Tabela 1: Variáveis Observadas - Caso: PMO dez/11

% EARM SE_NE	% Risco SE	% Risco S	% Risco NE	% Risco N	Custo GT (\$10^6)	%Séries abaixo 20%_SE	%Séries abaixo 20%_S	%Séries abaixo 20%_NE	%Séries abaixo 20%_N
20% - 20%	7.55	8.20	1.05	1.75	3422.71	24.0%	45.0%	72.4%	36.0%
20% - 25%	7.35	8.00	0.85	1.60	3462.93	23.9%	45.3%	69.3%	34.3%
20% - 30%	7.25	7.80	0.60	1.45	3497.73	23.8%	43.8%	67.2%	33.5%
...
35% - 30%	2.55	3.80	0.15	0.55	4134.59	12.9%	40.2%	63.4%	28.6%
35% - 35%	2.60	4.05	0.20	0.50	4206.43	12.7%	41.2%	62.0%	27.5%
35% - 40%	2.50	4.05	0.10	0.35	4289.97	12.6%	40.0%	60.2%	27.1%
...
40% - 35%	1.70	2.95	0.15	0.40	4510.18	10.2%	38.9%	60.1%	25.7%
...
50% - 40%	0.95	1.85	0.15	0.25	5392.38	6.1%	33.9%	55.3%	23.4%
50% - 45%	0.95	1.65	0.10	0.20	5531.57	5.9%	34.1%	54.1%	22.6%
50% - 50%	0.95	1.60	0.10	0.15	5667.72	5.7%	34.3%	53.3%	21.6%

	Risco_SE	Risco_S	Risco_NE	Risco_N	Custo GT	Abaixo20% SE	Abaixo20% S	Abaixo20% NE	Abaixo20% N
Unidade	%	%	%	%	\$(10^6)	%	%	%	%
Grupo	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Preferências									
Min/Max	min	min	min	min	min	min	min	min	min
Pesos	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00	2.00	0.50	1.00	0.50
Funções	Linear	Linear	Linear	Linear	L. área Linear	L. área Linear	L. área Linear	L. área Linear	L. área Linear
Limiares	Absoluto	Absoluto	Absoluto	Absoluto	Percentual	Absoluto	Absoluto	Absoluto	Absoluto
Q: indiferença	n/a	n/a	n/a	n/a	0.005	0.50	0.50	0.50	0.50
P: preferência	1.00	1.00	1.00	1.00	0.03	3.00	3.00	3.00	3.00

Figura 6: Pesos e Limiares Utilizados no Estudo de Caso

A Tabela 2 apresenta, resumidamente, a ordem das alternativas obtidas pelo sistema de apoio à decisão, com a aplicação do método PROMETHEE II. São apresentados também os fluxos positivo, negativo e total para cada alternativa. Observa-se que a melhor alternativa encontrada pelo método (maior fluxo total), em função das preferências dos decisores, foi o valor de energia armazenada de 40% para o subsistema Sudeste (SE) e 35% para o subsistema Nordeste (NE).

Tabela 2: Ordem das Alternativas - Caso: PMO dez/11

Ordem	Alternativas	Phi total	Phi+	Phi-
1	40% - 35%	0.0542	0.4138	0.3597
2	40% - 30%	0.0536	0.4118	0.3582
3	40% - 20%	0.0513	0.4175	0.3663
...
47	20% - 50%	-0.0527	0.3801	0.4328
48	20% - 25%	-0.0646	0.4141	0.4787
49	20% - 20%	-0.0888	0.419	0.5078

Depois de encontrada a solução (40% para o subsistema Sudeste e 35% para o subsistema Nordeste) é realizado um novo processamento com o grid de alternativas variando entre as combinações (SE=38% e NE=33%) de 1 em 1 por cento até (SE=42% e NE=37%). O objetivo desta etapa é refinar a solução encontrada. A Tabela 3 apresenta as variáveis observadas para esta etapa do estudo.

Os limiares e pesos utilizados nesta segunda etapa são os mesmos utilizados na primeira etapa do estudo, apresentados na Figura 6, e a ordem das alternativas obtida pelo sistema de apoio à decisão é apresentada na Tabela 4.

A melhor alternativa encontrada foi o armazenamento de 39% para o Sudeste e 33% para o Nordeste. Portanto, estes valores são os níveis metas estabelecidos pela metodologia proposta para o mês de novembro do ano de 2012.

Tabela 3: Variáveis Observadas para a Etapa de Refinamento da Solução - Caso: PMO dez/11

% EARM SE_NE	% Risco SE	% Risco S	% Risco NE	% Risco N	Custo GT (\$10^6)	%Séries abaixo 20%_SE	%Séries abaixo 20%_S	%Séries abaixo 20%_NE	%Séries abaixo 20%_N
38% - 33%	2.20	3.35	0.20	0.40	4350.99	11.3%	39.5%	61.6%	27.1%
38% - 34%	2.20	3.20	0.15	0.50	4374.69	11.3%	39.9%	61.2%	26.6%
38% - 35%	2.20	3.20	0.15	0.50	4385.19	11.3%	39.7%	60.8%	26.7%
...
39% - 33%	1.95	2.95	0.15	0.50	4410.50	10.7%	38.9%	61.1%	26.4%
...
40% - 34%	1.65	2.95	0.15	0.40	4494.92	10.2%	38.8%	60.4%	25.4%
40% - 35%	1.70	2.95	0.15	0.40	4510.18	10.2%	38.9%	60.1%	25.7%
40% - 36%	1.70	2.90	0.15	0.40	4531.19	10.1%	39.0%	59.5%	25.6%
...
42% - 35%	1.60	3.05	0.20	0.45	4645.20	9.4%	37.8%	59.6%	25.3%
42% - 36%	1.60	3.05	0.20	0.50	4664.64	9.4%	37.8%	59.0%	25.2%
42% - 37%	1.60	3.10	0.20	0.50	4680.38	9.3%	38.4%	58.9%	25.3%

Tabela 2: Ordem das Alternativas para a Etapa de Refinamento da Solução- Caso: PMO dez/11

Ordem	Alternativas	Phi total	Phi+	Phi-
1	39% - 33%	0.1937	0.2773	0.0836
2	38% - 33%	0.1882	0.3469	0.1587
3	38% - 34%	0.1725	0.3096	0.1371
...
23	42% - 35%	-0.2141	0.0841	0.2982
24	42% - 36%	-0.2319	0.0945	0.3263
25	42% - 37%	-0.2582	0.0921	0.3503

5. Análise de Sensibilidade

Para avaliar a estabilidade da solução selecionada em função dos pesos estabelecidos pelos decisores, foi realizada a análise apresentada na Figura 7, onde-se observam os intervalos em que os pesos podem ser variados, um de cada vez, sem que se altere a melhor alternativa definida pela metodologia.

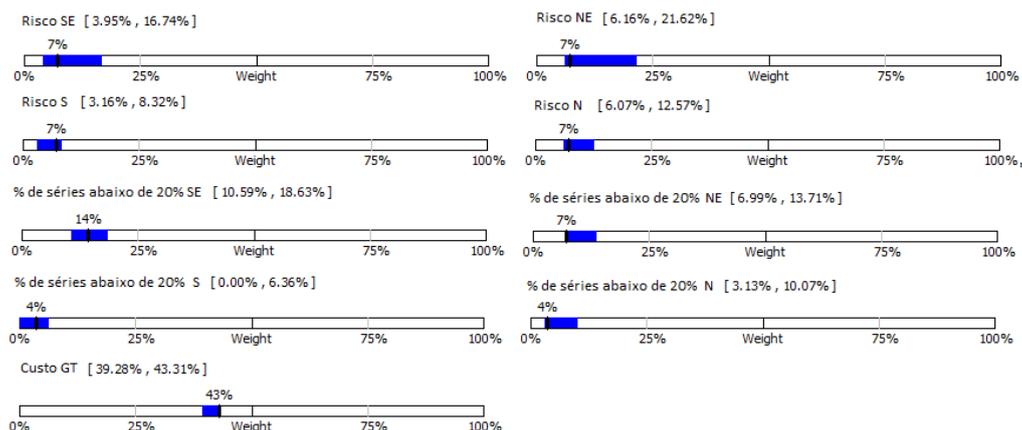


Figura 7: Intervalos de Confiança para Variação dos Pesos sem Alteração da Melhor Alternativa - Caso: PMO dez/11

Para avaliar a estabilidade da solução na etapa de aumento da precisão em função dos pesos estabelecidos pelos decisores, foi realizada a mesma análise da etapa anterior. Os resultados são apresentados na Figura 8.

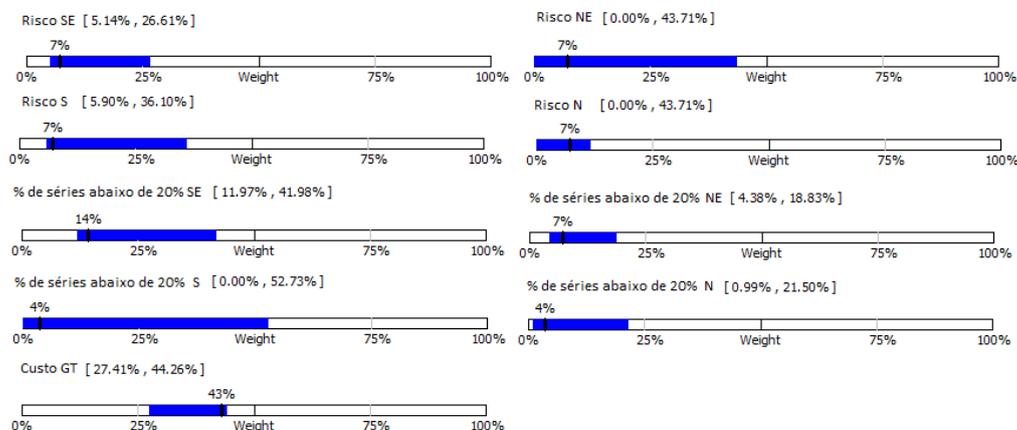


Figura 8: Intervalos de Confiança para Variação dos Pesos sem Alteração da Melhor Alternativa para a Etapa de Refinamento da Solução - Caso: PMO dez/11

Os resultados obtidos com a análise de sensibilidade realizada para as duas etapas indicam estabilidade da solução encontrada pela metodologia em relação a pequenas variações nos pesos estabelecidos pelos decisores na primeira etapa e a variações mais significativas na segunda etapa. Na segunda etapa o grid de alternativas varia de 1% em 1% em torno da solução encontrada, com isto a avaliação das alternativas em relação aos critérios se tornam mais próximas, em alguns casos até igual, provocando maiores faixas de estabilidade da solução.

6. Conclusões

O planejamento da operação do SIN é realizado por uma cadeia de modelos de otimização cujo critério é a minimização do valor esperado do custo total de operação em todo o período de planejamento. Entretanto, o racionamento de energia ocorrido em meados de 2001 tornou evidente a necessidade de discussão e revisão do critério de otimização, neutro ao risco, implementado até então. Conseqüentemente, o desenvolvimento de uma formulação capaz de incorporar aspectos de segurança à otimização econômica se tornou necessário.

A entrada de grandes usinas a fio d'água na região Amazônica, a necessidade de desenvolvimento de uma modelagem que possibilite a consideração de múltiplos objetivos e a

necessidade de assegurar a sistematização do processo decisório foram os principais motivadores para a realização deste trabalho, cujo foco é a proposta de uma nova modelagem para a definição dos níveis metas para o problema de planejamento da operação.

Para a definição dos níveis metas é proposto um sistema de apoio à decisão que avalia um conjunto de alternativas de possibilidades de armazenamento para os subsistemas Sudeste e Nordeste. O sistema proposto utiliza o método PROMETHEE II para classificar as alternativas com base nas preferências dos decisores em relação a critérios relacionados à segurança energética (percentual de risco de déficit e percentual de séries que levam o armazenamento abaixo de 20%) e economicidade (custo de geração térmica para atingir os níveis metas).

As principais contribuições deste trabalho, através da metodologia proposta, em relação à metodologia atualmente utilizada para a determinação dos níveis metas foram a sistematização da tomada de decisão mantendo a reprodutibilidade; a não necessidade de estabelecimento prévio de série hidrológica crítica; a não necessidade de definição de premissas de intercâmbio; e a possibilidade de tratamento de outras condicionantes que não são possíveis na metodologia atual, tais como o custo para alcançar os níveis metas.

Uma possível limitação da metodologia proposta é o grande número de alternativas, caso se queira trabalhar com uma faixa maior de níveis de armazenamento ou determinar os níveis metas para um número grande de subsistemas. Esta possível limitação pode ser contornada com a eliminação de alternativas através da experiência dos decisores, eliminando a priori as alternativas de combinações de armazenamentos que os decisores julgarem não serem factíveis.

Recomenda-se, como extensão deste trabalho, a consideração de outros critérios no sistema de apoio à decisão, tais como o atendimento à demanda de ponta e a consideração de falhas dos grandes troncos de interligação entre a região Amazônica e o subsistema Sudeste/Centro-Oeste.

Referências

- Belton, V., Stewart T. J., e Carignano C.**, Multiple Criteria Decision Analysis, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Brans J. P. e Vincke P.** (1985), A preference ranking organisation method, Management Science, vol. 31 nº 6.
- Brans J. P., Vincke P.H. e Mareschal B.** (1986), How to Select and How to Rank Projects: the PROMETHEE Method, European Journal of Operational Research.
- CEPEL**, Manual do Usuário do Programa NEWAVE Versão 17, 2012.
- EPE**, Plano Decenal de Expansão de Energia 2020.
- GOMES L. F. A. M., Gomes C. F. S. e Almeida A. T.**, Tomada de Decisão Gerencial Um Enfoque Multicritério, Editora Atlas, 2002.
- GOMES L. F. A. M., Araya M. C. G. e Carignano C.**, Tomada de Decisões em Cenários Complexos, Thomson, 2004.
- Mareschal B. e Brans J. P.** (1988), Geometrical representations for MCDA, European Journal of Operational Research, vol. 34.
- ONS**, Nota Técnica 50/2010 - Metodologia de Segurança Operativa - Níveis Metas de Armazenamento, 2010.
- ONS**, Nota Técnica 65/2011 - Procedimentos Operativos de Curto Prazo, 2011.
- Promethee**, Software disponível na internet <http://www.promethee-gaia.net>, acesso em julho de 2012.