



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPL 07
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO VII

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

APRIMORAMENTO NA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA ENERGIA ASSEGURADA

Maria Elvira Piñeiro Maceira^{1,2} Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier¹

¹ **CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

² **UERJ – UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

RESUMO

A metodologia atual para o cálculo da energia assegurada do sistema interligado de geração de energia elétrica brasileiro baseia-se na determinação da oferta de energia do sistema interligado ao risco pré-fixado de 5% ao ano. A oferta de energia do sistema a cada ano é obtida com base em uma simulação estática probabilística de sua operação com um modelo de otimização, onde o sistema real é representado por subsistemas equivalentes interligados. Calculada a energia assegurada de cada subsistema, ela é desagregada entre as suas usinas hidroelétricas com base em uma simulação estática individualizada de sua operação, com as séries de aflúências do período crítico observado no histórico (energia firme).

Este artigo discute aprimoramentos na metodologia vigente a fim de contornar algumas limitações, tais como: (i) o rateio da energia assegurada entre as usinas hidroelétricas é realizado com base em um único período crítico observado no histórico (energia firme) e (ii) as metas de geração hidráulica definidas para o subsistema equivalente podem não ser satisfatoriamente atendidas quando se levam em conta os limites de turbinamento e armazenamento nas usinas hidroelétricas. A metodologia é avaliada através de um estudo de caso real do sistema interligado nacional (SIN).

PALAVRAS-CHAVE

Energia Assegurada, Planejamento da Operação, Simulação a Usinas Individualizadas.

1.0 - INTRODUÇÃO

A metodologia de cálculo da energia assegurada do sistema interligado de geração de energia elétrica brasileiro baseia-se na determinação da oferta de energia do sistema interligado ao risco pré-fixado de 5% ao ano, limitado por uma tolerância de 0,1%. A oferta de energia do sistema a cada ano é obtida com base em uma simulação estática probabilística de sua operação com um modelo de otimização. Nessa simulação, o sistema real é representado por subsistemas equivalentes interligados e o risco de déficit em cada subsistema é a probabilidade anual de déficit de energia. Calculada a energia assegurada do sistema, ela é rateada entre as usinas termelétricas e o bloco hidráulico. Este, por sua vez, é desagregado entre as usinas hidroelétricas com base em suas energias firmes, conforme Anexo I da Portaria MME nº 303, de 18/11/2004 [1].

Uma crítica a esta metodologia é que a energia assegurada do sistema é calculada com séries sintéticas de aflúências e o rateio pelas usinas hidroelétricas é feito com base na energia firme, pois o modelo de simulação que tem sido utilizado não é capaz de simular a operação individualizada das usinas com séries sintéticas de vazões. Como consequência, o rateio da energia assegurada do sistema pelas usinas hidroelétricas é fortemente dependente do período crítico presente no registro histórico de vazões. Este período crítico é particularmente severo para alguns subsistemas do país e favorável para outros. Uma alternativa seria a utilização de séries sintéticas de vazões também no rateio da energia assegurada pelas usinas hidroelétricas, que permitiria a ocorrência de outros períodos secos, de durações diferentes e condições hidrológicas distintas do atual período

crítico observado no histórico.

Além disso, a meta de geração hidráulica definida pelo sistema equivalente, ao ser desagregada pelas usinas hidroelétricas, pode, em algumas situações, não ser satisfatoriamente atendida, por exemplo, levando a uma maior ocorrência de déficits nos subsistemas.

Neste artigo, será apresentado o modelo de simulação a usinas individualizadas, SUIISHI [2], que define o requisito de energia a ser atendido por cada subsistema levando em consideração a política de operação de cada mês calculada pelo modelo NEWAVE [3] e é capaz de utilizar séries sintéticas de vazões. O modelo SUIISHI resolve inicialmente o problema de balanço hidrotérmico dos subsistemas equivalentes, no qual são definidas metas de intercâmbio e geração hidráulica e térmica para cada um dos subsistemas. Após esta etapa, é feita uma simulação a usinas individualizadas com o objetivo de atender a essas metas, onde a meta de geração hidráulica definida pelo balanço hidrotérmico é o mercado a ser atendido pelas usinas hidroelétricas. Caso isso não seja possível, resolve-se novamente o problema de balanço hidrotérmico, com restrições adicionais, objetivando a obtenção de metas de geração hidráulica que possam ser atendidas pelas usinas hidroelétricas de cada subsistema.

O uso conjunto dos modelos NEWAVE e SUIISHI permite, desta forma, que se avance no aprimoramento metodológico do cálculo das energias asseguradas do sistema hidrotérmico interligado.

2.0 - METODOLOGIA DE CÁLCULO DA GARANTIA FÍSICA DE ENERGIA

O cálculo da energia assegurada, conforme Anexo I da Portaria MME nº 303, de 18/11/2004, pode ser resumida segundo descrição a seguir.

2.1 Energia Assegurada do Sistema

A determinação da oferta global de energia, correspondente à energia assegurada do sistema para uma dada configuração, se faz por meio da simulação estática da configuração hidrotérmica, com quatro subsistemas interligados (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul), empregando-se o modelo NEWAVE.

Este modelo determina, para cada mês do período de simulação:

- os valores de geração hidráulico associados aos subsistemas equivalentes;
- os valores de geração associados à cada usina termelétrica;
- os intercâmbios entre os subsistemas eletricamente conectados.

Essa simulação é feita com uma configuração estática em um horizonte de 5 anos, com períodos estáticos de estabilização inicial (10 anos, de forma a amortecer a influência das condições iniciais de armazenamento e afluições) e final (5 anos, de forma a amortecer a influência das condições de fechamento de horizonte simulado).

A aferição do atendimento ao critério de suprimento (risco pré-fixado de 5 %) toma por base a média dos riscos entre 11º e o 15º ano do período de simulação, empregando-se 2.000 séries sintéticas de energias afluentes.

No processo de ajuste para se obter a média de 5% para o risco prefixado durante os cinco anos da simulação com a configuração estática, mantém-se uma proporção fixa entre as ofertas dos subsistemas Sul e Sudeste, assim como nas ofertas dos subsistemas Norte e Nordeste. Há uma variação livre, no entanto, da oferta conjunta dos sistemas Sul/Sudeste e Norte/Nordeste. O processo é considerado convergido quando, no mínimo, um dos dois subsistemas de cada sistema (Sul/Sudeste e Norte/Nordeste) simultaneamente atinge o risco de 5%, admitida uma tolerância de 0,1%.

2.2 Rateio da Energia Assegurada do Sistema entre Hidrelétricas e Termelétricas

O rateio da energia assegurada do sistema entre os blocos de usinas hidrelétricas e de usinas termelétricas é baseado na ponderação, pelo custo marginal de operação - CMO, das gerações obtidas na simulação para cada série sintética de energias afluentes. A oferta hidráulica (EH) é obtida pela expressão:

$$EH = FH \sum_{s=1}^4 ccrítica(s) \quad (1)$$

onde:

ccrítica(s) carga crítica do subsistema s, cujo somatório representa a oferta global do sistema garantida a 95%;
 FH Fator Hidro, valoriza a geração em cada mês e em cada série pelo correspondente CMO.

O Fator Hidro é calculado pela expressão:

$$FH = \frac{\sum_{s=1}^4 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} gh(i, j, k, s) cmo(i, j, k, s)}{\sum_{s=1}^4 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} \left[gh(i, j, k, s) + \sum_{l=1}^{nts} gt(i, j, k, l, s) \right] cmo(i, j, k, s)} \quad (2)$$

onde:

- gh(i,j,k,s) geração hidráulica total (controlável + fio d'água + vazão mínima), para o mês i, para o ano j, para a série k e para o subsistema s proveniente dos resultados do modelo NEWAVE;
- gt(i,j,k,l,s) geração térmica total, para o mês i, para o ano j, para a série k, para a térmica l e para o subsistema s proveniente dos resultados do modelo NEWAVE;
- cmo(i,j,k,s) custo marginal de operação, para o mês i, para o ano j, para a série k e para o subsistema s proveniente dos resultados do modelo NEWAVE;
- nts número de térmicas do sistema.

A oferta térmica (ET) é obtida de forma semelhante às expressões (1) e (2), substituindo-se a variável gh (geração hidráulica por subsistema) por gt (geração térmica por classe), conforme as expressões (3) e (4).

$$ET(l, s) = FT(l, s) \sum_{s=1}^4 ccrítica(s) \quad (3)$$

$$FT(l, s) = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} gt(i, j, k, l, s) cmo(i, j, k, s)}{\sum_{s=1}^4 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} \left[gh(i, j, k, s) + \sum_{l=1}^{nts} gt(i, j, k, l, s) \right] cmo(i, j, k, s)} \quad (4)$$

O cálculo da oferta térmica é feito por usina térmelétrica (ou classe térmica, conjunto de usinas caracterizado pelo custo variável de geração). Já a oferta hidráulica é calculada para o conjunto de todas as usinas da configuração, demandando uma etapa posterior, em que essa oferta é rateada entre as usinas, com base na energia firme.

2.3 Rateio da Oferta Hidráulica pelas Usinas Hidrelétricas

O rateio da oferta hidráulica (EH) pelas usinas é feito proporcionalmente à energia firme de cada usina. Para tanto, utiliza-se modelo de simulação estático que represente as usinas individualizadas. Atualmente, utiliza-se o modelo MSUI (Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas), da ELETROBRÁS. A energia firme é calculada considerando as vazões do período crítico do sistema brasileiro (junho de 1949 a novembro de 1956).

2.4 Considerações sobre a Metodologia Vigente

A metodologia apresentada anteriormente apresenta algumas limitações:

- a. o rateio da energia garantida entre as usinas hidroelétricas é feito com base em sua energia firme: a energia firme das usinas hidroelétricas corresponde à sua geração média no período crítico utilizando-se o registro histórico de afluências. As vazões ocorridas no período de junho de 1949 a novembro de 1956 não apresentam o mesmo grau de severidade em todos os subsistemas. Conforme ilustrado na Figura 1, a severidade das vazões nos subsistemas Sudeste e Norte não é acompanhada pelo subsistema Sul e é acompanhada em menor proporção pelo subsistema Nordeste. Resumindo, o rateio da energia assegurada pelas usinas hidroelétricas baseia-se em apenas um período crítico, período este com características distintas entre os subsistemas;
- b. as metas de geração hidráulica definidas para o subsistema equivalente podem não ser satisfatoriamente atendidas quando se considera a operação individualizada das usinas hidroelétricas: a operação do SIN considerando as usinas de forma individualizada é mais complexa do que a obtida por meio de sua representação em reservatórios equivalentes. Como as usinas hidroelétricas de uma mesma cascata possuem diferentes capacidades de armazenamento e turbinamento, e de acordo com a forma como as afluências se distribuem entre as usinas, a meta de geração definida para o subsistema pode levar à ocorrência de déficits ou de vertimentos turbináveis nos subsistemas.

Este artigo apresenta um possível aprimoramento na metodologia vigente a fim contornar as limitações discutidas que prevê, adicionalmente, a utilização de um simulador a usinas individualizadas da operação de sistemas hidrotérmicos, chamado SUIHI, cuja descrição está no item 3. No item 4 será descrita uma variante da metodologia vigente.

3.0 - SIMULADOR A USINAS INDIVIDUALIZADAS DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS INTERLIGADOS

O modelo SUIHI é um modelo de simulação a usinas individualizadas, da operação energética de sistemas hidrotérmicos interligados e, é composto por dois módulos:

1. Modelo de Otimização do Balanço Hidrotérmico entre Subsistemas
2. Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas

O *módulo de otimização* do balanço hidrotérmico entre subsistemas tem como objetivo definir as metas de geração hidráulica para cada subsistema. Isto é feito mediante a solução de um problema de programação linear, que tem por objetivo minimizar o custo total de operação ao longo do período de planejamento sujeito às restrições de balanço hídrico, atendimento à demanda, armazenamento máximo, geração hidráulica máxima e também à função de custo futuro, proveniente do modelo NEWAVE.

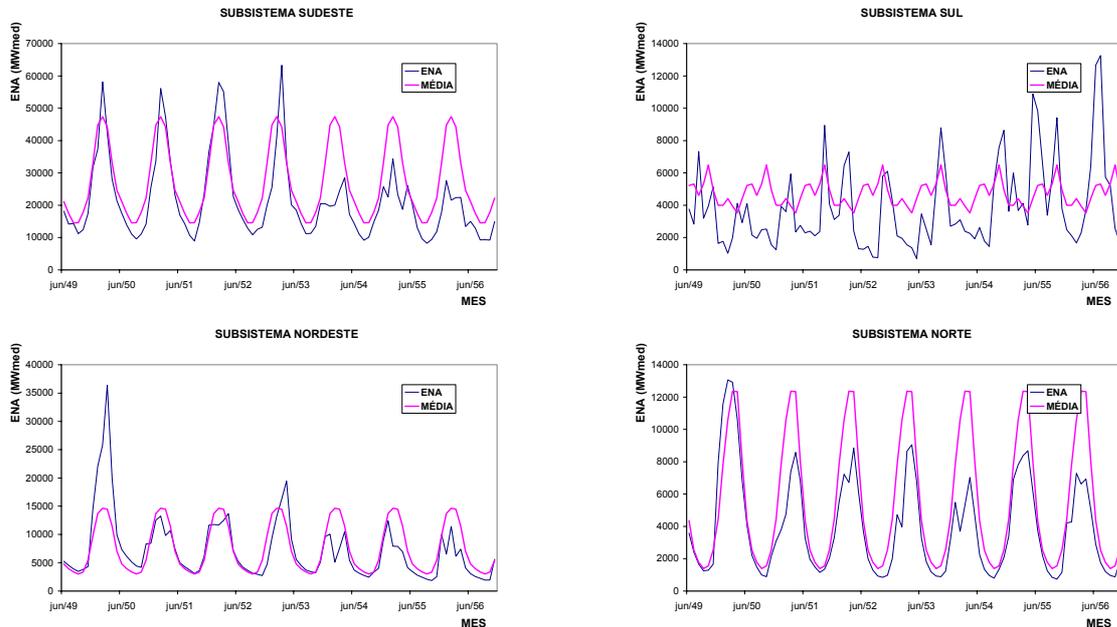


FIGURA 1 – Energias Naturais Afluentes durante o Período Crítico do Sistema (Jun-49 a Nov-56)

O *módulo de simulação* a usinas individualizadas tem a finalidade de operar as usinas dos subsistemas de modo a atender a geração hidráulica definida no módulo de otimização, procurando reproduzir o mais fielmente possível o processo de decisão adotado na prática para se estabelecer quais os turbinamentos e armazenamentos finais de cada usina hidrelétrica. Esta simulação é feita segundo uma política de operação, cujas principais características são:

- baseia-se em prioridades de enchimento/deplecionamento e faixas operativas;
- procura manter todos os reservatórios do sistema, tanto quanto possível, dentro de uma mesma faixa de operação;
- considera o efeito do deplecionamento de um reservatório em reservatórios a jusante, evitando vertimentos em algum reservatório a jusante, exceto para se evitar um déficit de geração;
- procura manter livre a faixa superior dos reservatórios para aumentar a capacidade de armazenamento do excesso de aflúências durante o período molhado, minimizando-se os vertimentos a jusante;
- procura manter cheia a faixa inferior dos reservatórios para evitar uma excessiva perda de potência no sistema devido à redução das alturas de queda líquida.

Como na primeira solução do problema de balanço hidrotérmico dos subsistemas não se leva em conta a limitação de turbinamento nas usinas, conforme considerado no módulo de simulação, a geração hidráulica por subsistema definida no módulo de otimização pode ser muito alta, representando uma meta inatingível na etapa de simulação. Neste caso, não se pode aceitar a solução do problema original, ou seja, o problema de cálculo do balanço hidrotérmico mensal entre os subsistemas precisa ser reformulado visando corrigir este “otimismo”. Isto é feito resolvendo-se novamente o problema de balanço hidrotérmico, tomando-se a soma das gerações hidráulicas das usinas hidroelétricas deste subsistema obtidas no módulo de simulação como a nova geração hidráulica máxima a ser considerada no novo problema de otimização. Esta restrição adicional tem por objetivo forçar uma correspondente redução da geração hidráulica deste subsistema.

Por outro lado, quando as vazões afluentes se acham mal distribuídas com relação ao estado de armazenamento dos reservatórios, pode ser impossível guardar toda a água excedente, o que pode levar à ocorrência de vertimentos turbináveis. Também neste caso o problema de cálculo do balanço hidrotérmico mensal entre os subsistemas precisa ser reformulado. Isto pode ser feito resolvendo-se novamente o problema de balanço hidrotérmico, com uma nova restrição: toma-se a energia armazenada total neste subsistema como o novo limite

de armazenamento no módulo de otimização. Essa restrição adicional objetiva forçar um correspondente aumento da geração hidráulica ótima deste subsistema. O processo iterativo descrito encontra-se ilustrado na Figura 2.

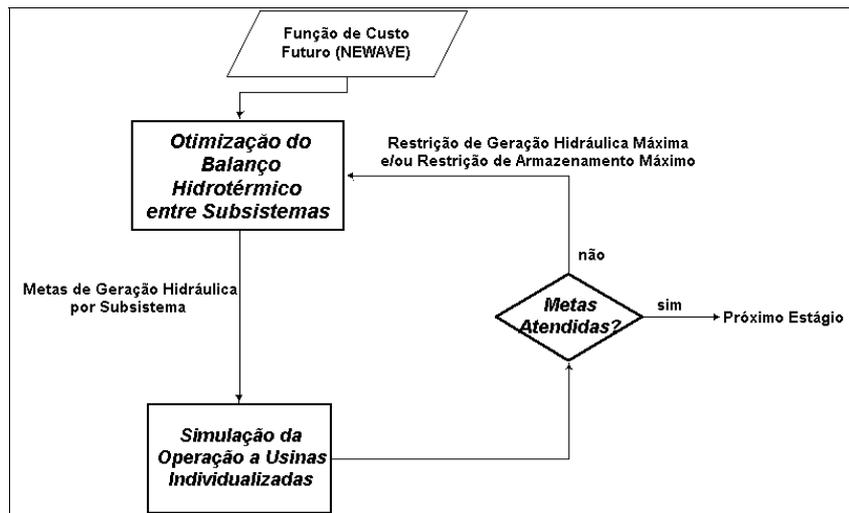


FIGURA 2 – Relação entre os módulos do modelo SUIISHI

Esse processo iterativo prossegue até que os déficits e os excessos de geração tenham sido anulados, ou que não haja operação possível que os anule. Na prática, tem-se observado que esse processo converge em poucas iterações.

O modelo SUIISHI considera ainda quatro modos de simulação: simulação estática, simulação dinâmica, simulação estática com cálculo da energia firme (com busca automática de período crítico ou período crítico definido pelo usuário) e simulação estática com cálculo da energia garantida a um certo risco desejado.

4.0 - APRIMORAMENTO NO CÁLCULO DA GARANTIA FÍSICA DE ENERGIA

Este item descreve uma variante da metodologia vigente para calcula da garantia física de energia das usinas hidroelétricas e termelétricas, que permite contornar as limitações discutidas no item 2.4.

4.1 Energia Assegurada do Sistema

Nesta etapa, o cálculo da energia assegurada do sistema para uma dada configuração, se fará por meio da simulação estática da configuração hidrotérmica, com quatro subsistemas interligados (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul), empregando-se os modelos NEWAVE e SUIISHI. O atendimento ao critério de suprimento (risco pré-fixado de 5 %) continuará tomando por base (i) a média dos riscos entre 11º e o 15º ano do período de simulação, empregando-se 2.000 séries sintéticas de energias afluentes, (ii) a tolerância de 0,1%, (iii) a proporção fixa entre as ofertas dos subsistemas Sul e Sudeste, dos subsistemas Norte e Nordeste e a variação livre da oferta conjunta dos sistemas Sul/Sudeste e Norte/Nordeste.

Inicialmente, obtém-se a energia assegurada do sistema a um risco pré-fixado de 5 % e tolerância de 0,1% com o modelo NEWAVE (procedimento é idêntico ao estabelecido pela Portaria MME 303/2004). A energia assegurada do sistema, assim calculada considera apenas as restrições a subsistemas equivalentes.

A segunda etapa consiste em calcular a energia assegurada do sistema a um risco pré-fixado de 5% e tolerância de 0,1%, com o modelo SUIISHI, ou seja, considerando-se também as restrições às usinas individualizadas, e utilizando-se a função de custo futuro calculada pelo modelo NEWAVE na etapa um. A simulação com o modelo SUIISHI considera a mesma configuração hidrotérmica, horizonte de simulação, 2000 séries de vazões afluentes às usinas hidroelétricas, critérios de convergência (5% com 0,1% de tolerância) e proporcionalidade entre mercados.

Caso a energia assegurada do sistema calculada com o modelo SUIISHI, a partir da política de operação (função de custo futuro) calculada na etapa um, for diferente daquela calculada pelo modelo NEWAVE, deve-se recalculá-la a partir da política de operação considerando-se agora os mercados dos subsistemas calculados com o modelo SUIISHI (soma das cargas críticas por subsistema). É importante lembrar que nesta nova etapa (etapa três), é necessário apenas uma rodada com o modelo NEWAVE. De posse de uma nova função de custo futuro, alimenta-se novamente o modelo SUIISHI para cálculo da energia assegurada do sistema. Este processo deve se repetir até que a energia assegurada do sistema, calculada pelo modelo SUIISHI, seja a mesma considerada para cálculo da função de custo futuro feita com o modelo NEWAVE, ou que a diferença entre elas esteja dentro de uma tolerância, por exemplo, 1%. A Figura 3 ilustra o processo.

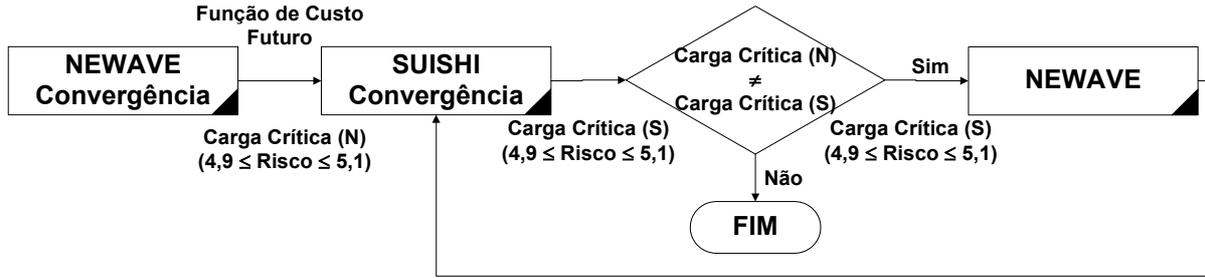


FIGURA 3 – Determinação da carga crítica dos subsistemas segundo a metodologia proposta

4.2 Rateio da Energia Assegurada do Sistema entre Usinas Hidrelétricas e Usinas Termelétricas

Analogamente à metodologia descrita na Portaria MME 303/2004 o rateio da energia assegurada do sistema entre os blocos de usinas hidroelétricas e de usinas termelétricas será baseado na ponderação, pelo custo marginal de operação - CMO, das gerações obtidas na simulação para cada série sintética de vazões afluentes às usinas hidroelétricas. A diferença está no uso dos resultados da simulação da operação do sistema obtidos com o modelo SUIISHI. As equações (1) a (4) são reescritas da seguinte forma:

$$EH = FH \sum_{s=1}^4 ccrítica(s) \quad (5)$$

$$FH = \frac{\sum_{s=1}^4 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} \sum_{m=1}^{nth} gh(i, j, k, m, s) cmo(i, j, k, s)}{\sum_{s=1}^4 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} \left[\sum_{m=1}^{nth} gh(i, j, k, m, s) + \sum_{l=1}^{nts} gt(i, j, k, l, s) \right] cmo(i, j, k, s)} \quad (6)$$

$$ET(l, s) = FT(l, s) \sum_{s=1}^4 ccrítica(s) \quad (7)$$

$$FT(l, s) = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} gt(i, j, k, l, s) cmo(i, j, k, s)}{\sum_{s=1}^4 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{15} \sum_{k=1}^{2000} \left[\sum_{m=1}^{nth} gh(i, j, k, m, s) + \sum_{l=1}^{nts} gt(i, j, k, l, s) \right] cmo(i, j, k, s)} \quad (8)$$

onde:

- nth n° de usinas hidroelétricas do subsistema s;
- gh(i,j,k,m,s) geração hidráulica da usina m, para o mês i, para o ano j, para a série k e pertencente ao subsistema s proveniente dos resultados do modelo SUIISHI;
- gt(i,j,k,l,s) geração térmica total, para o mês i, para o ano j, para a série k, para a térmica l e para o subsistema s proveniente dos resultados do modelo SUIISHI;
- cmo(i,j,k,s) custo marginal de operação, para o mês i, para o ano j, para a série k e para o subsistema s proveniente dos resultados do modelo SUIISHI;

4.3 Rateio da Oferta Hidráulica pelas Usinas Hidrelétricas

Uma alternativa para o rateio da oferta hidráulica (EH) pelas usinas é o cálculo proporcional à média da geração de cada usina dentro dos períodos críticos encontrados nas séries sintéticas de vazões entre o 11^o e 15^o anos do horizonte de estudo (ghpc(m)). Define-se um período crítico do sistema como o período entre a última vez que o sistema está cheio (a menos de uma tolerância) e a última vez que o sistema encontrava-se em deficit, sem reenchimentos intermediários. Assim, a energia assegurada de cada usina hidroelétrica passa a ser dada por:

$$EH(m) = FH \frac{\sum_{n=1}^{npc} ghpc(m)}{\sum_{m=1}^{nth} \sum_{n=1}^{npc} ghpc(m)} \quad (9)$$

A energia assegurada de cada subsistema será dada pela soma das energias asseguradas de suas usinas hidroelétricas.

5.0 - ESTUDO DE CASO

Para ilustrar a variante metodológica, adotou-se o caso utilizado para o cálculo da garantia física das usinas em referência ao ano 2000, denominado Oferta2000. Esse caso, possui um horizonte de 20 anos, sendo utilizados 10 anos como período pré-estudo e 5 anos como período de pós-estudo. Assim, para efeito de avaliação dos riscos de déficit, foi considerado o intervalo compreendido entre o 11^o e 15^o anos. Participam da configuração 78 usinas

hidroelétricas e 19 termelétricas. Foi considerado apenas 1 patamar de carga, 1 patamar de déficit (R\$540/MWh) e sem limites de intercâmbio entre os subsistemas.

O estudo foi efetuado nas seguintes etapas: (i) aplicando-se a metodologia da Portaria MME nº 303, de 18/11/2004 e, (ii) aplicando-se o aprimoramento na metodologia vigente.

Cálculo das cargas críticas do Brasil e por subsistema, cálculo das energias asseguradas das usinas hidrelétricas e térmicas segundo a metodologia da Portaria MME nº 303, de 18/11/2004.

5.1 Cálculo das cargas críticas e das energias asseguradas - Portaria MME nº 303, de 18/11/2004

Com o modelo NEWAVE, a partir da variação do mercado (estático) dos subsistemas, foram obtidos os mercados dos subsistemas que levavam à riscos de déficit anuais médios no período de interesse (11º ao 15º ano) de 5%, com tolerância de 0,1%. Na Tabela 1 são exibidos a carga crítica do sistema e os riscos de déficit anuais médios dos subsistemas.

TABELA 1 – Carga Crítica e Risco de Déficit Anual Médio – modelo NEWAVE

Subsistema	SUDESTE	SUL	NORDESTE	NORTE	BRASIL
Mercado (MWmês)	-	-	-	-	41.314
Risco de Déficit (%)	5,01	3,3	3,49	5,03	-

Com base nos resultados obtidos na etapa anterior, foram calculados os fatores hidráulico do sistema e térmicos de cada classe. O fator hidráulico (expressão 2) foi igual a 0,85728, conseqüentemente o fator térmico foi igual a 0,14272 (expressão 4). A partir desse valor, e da carga crítica obtida na etapa anterior, calculou-se o bloco térmico, igual a 5.896,3MWmês, e o bloco hidráulico, igual a 35.417,7MWmês. Segundo preconizado na Portaria MME 303/2004, esse valor deve ser utilizado para a definição das energias asseguradas das usinas hidroelétricas, que será rateada proporcionalmente às suas energias firmes.

O rateio da oferta hidráulica (EH) pelas usinas foi feito proporcionalmente à energia firme de cada usina. Neste estudo, utilizou-se o modelo SUIISHI, opção cálculo de energia firme. A Tabela 2 apresenta a soma das energias asseguradas das usinas hidroelétricas de cada subsistema, em percentual da energia assegurada do bloco hidráulico.

TABELA 2 – Energias Asseguradas – Bloco Hidráulico - Portaria MME nº 303, de 18/11/2004

Subsistema	SUDESTE	SUL	NORDESTE	NORTE	BRASIL
Energias Asseguradas	63%	11%	17%	9%	35.417,7

5.2 Cálculo das cargas críticas e das energias asseguradas – Variante Metodológica

Com a função de custo futuro, FCF1, que representa a política de operação do Sistema Interligado Nacional considerando-se o mercado do sistema apresentado na Tabela 1, foi utilizado o modelo SUIISHI para se obter as cargas críticas associadas à um risco de déficit anual médio de 5%, com tolerância de 0,1%. Nesta simulação, foram utilizadas 2000 séries sintéticas de vazões afluentes às usinas hidroelétricas que compõem a configuração, geradas através do modelo GEVAZP (5). A configuração adotada no modelo SUIISHI é a mesma utilizada no modelo NEWAVE, ou seja, uma configuração hidrotérmica.

Na Tabela 3 são apresentados os riscos de déficit médios anuais obtidos para cada subsistema, bem como a carga crítica do sistema. Como esperado, o mercado total de convergência obtido pelos modelos NEWAVE/SUIISHI foi inferior ao obtido unicamente pelo modelo NEWAVE.

TABELA 3 – Carga Crítica e Risco de Déficit Anual Médio – modelos NEWAVE / SUIISHI

Subsistema	SUDESTE	SUL	NORDESTE	NORTE	BRASIL
Mercado (MWmês)	-	-	-	-	38.734
Risco de Déficit (%)	5,05	2,94	1,55	4,91	-

Como a função de custo futuro utilizada, FCF1, foi calculada a partir de um mercado diferente do encontrado pelo modelo SUIISHI, calculou-se com o modelo NEWAVE, a partir dos mercados obtidos com o modelo SUIISHI, uma nova política de operação, representada por uma nova função de custo futuro, FCF2, e esta foi utilizada para a obtenção da nova carga crítica com os modelos NEWAVE/SUIISHI, igual a 39.357 MWmês. Como esperado, a nova carga crítica foi semelhante à da etapa anterior (diferença de 1,5% para os subsistemas Sudeste e Sul, e 1,9% para o Nordeste e o Norte).

Com vistas a reduzir ainda mais a diferença existente entre o mercado utilizado no cálculo da função de custo futuro pelo modelo NEWAVE e a carga crítica calculada pelo modelo SUIISHI, foi calculada nova função de custo futuro, FCF3, com o modelo NEWAVE a partir dos mercados (carga crítica) encontrados na última iteração com o

modelo SUIISHI. Com a nova política de operação encontrada, foi obtida a nova carga crítica com os modelos NEWAVE/SUIISHI, reproduzida na Tabela 4. Como os novos mercados obtidos foram diferentes dos mercados iniciais em no máximo 1%, considerou-se o algoritmo convergido.

TABELA 4 – Carga Crítica e Risco de Déficit Anual Médio – modelos NEWAVE/SUIISHI

Subsistema	SUDESTE	SUL	NORDESTE	NORTE	BRASIL
Mercado (MWmês)	-	-	-	-	39.009
Risco de Déficit (%)	5,07	2,08	3,23	5,08	-

Comparando-se as cargas críticas obtidas com a metodologia vigente (41.314 MWmês) e a variante (39.009 MWmês) verifica-se uma redução de aproximadamente 5,6%, atribuída aqui à representação de limites nas capacidades de armazenamento e turbinamento das usinas hidroelétricas, conforme item 2.

Após a obtenção da carga crítica do sistema (39.009 MWmês), foram utilizadas as expressões (6) e (8) para a determinação dos fatores hidro e térmico. O fator hidráulico foi igual a 0,8688 e o térmico, 0,1312. Observa-se um pequeno aumento na participação hidráulica em detrimento da térmica. A partir da carga crítica e do valor do FH, calculou-se o valor do bloco hidráulico, igual a 33.891,3 MWmês.

Na variante metodológica, o rateio da oferta hidráulica (EH) pelas usinas é feito proporcionalmente à média da geração de cada usina dentro dos períodos críticos encontrados nas séries sintéticas de vazões entre o 11^o e 15^o anos do horizonte de estudo. Neste caso exemplo, em 2000 cenários de aflúncias, foram encontrados 151 períodos críticos. Para cada usina hidroelétrica, foi calculada a média da sua geração considerando-se todos os períodos críticos. A Tabela 5 apresenta a soma das energias asseguradas das usinas hidroelétricas de cada subsistema, em percentual da energia assegurada do bloco hidráulico.

TABELA 5 – Energias Asseguradas – Bloco Hidráulico – Variante Metodológica

Subsistema	SUDESTE	SUL	NORDESTE	NORTE	BRASIL
Energias Asseguradas	65%	10%	16%	9%	33891,3

Comparando-se os resultados da Tabela 5 com os da Tabela 2, correspondentes à metodologia da Portaria MME 303/2004, observa-se um acréscimo no percentual da soma das energias asseguradas das usinas do subsistema Sudeste (2%) em detrimento de uma redução nos subsistemas Sul (1%) e Nordeste (1%). O subsistema Norte não apresentou variação. Estes resultados indicam que as séries sintéticas de vazões apresentaram outros períodos críticos, com comportamentos distintos ao da série histórica, que é particularmente muito severo para o subsistema Sudeste.

6.0 - CONCLUSÕES

A metodologia de cálculo da energia garantida do sistema interligado de geração de energia elétrica brasileiro baseia-se na determinação da oferta de energia do sistema interligado ao risco pré-fixado de 5% ao ano. A oferta de energia do sistema a cada ano é obtida com base em uma simulação estática probabilística de sua operação com um modelo de otimização, onde o sistema real é representado por subsistemas equivalentes interligados. Calculada a energia garantida de cada subsistema, ela é desagregada entre as suas usinas hidroelétricas com base em uma simulação estática individualizada de sua operação, com as séries de aflúncias do período crítico observado no histórico (energia firme).

Este artigo apresentou um aprimoramento na metodologia vigente a fim contornar algumas limitações, tais como, (i) rateio da energia garantida entre as usinas hidroelétricas é realizado com base em um único período crítico observado no histórico (energia firme) e (ii) as metas de geração hidráulica definidas para o subsistema equivalente podem não ser satisfatoriamente atendidas quando se levam em conta os limites de turbinamento e armazenamento nas usinas hidroelétricas. A metodologia foi avaliada através de um estudo de caso real do sistema interligado nacional. Neste caso exemplo, foi observada uma redução na energia assegurada do sistema, em aproximadamente 5,6%. Esta redução é atribuída a consideração de restrições nos limites de armazenamento e turbinamento das usinas hidroelétricas. Adicionalmente, verificou-se um aumento no rateio da oferta do bloco hidráulico pelas usinas hidroelétricas do subsistema Sudeste e uma redução deste rateio pelos subsistemas Sul e Nordeste. Isto se deveu à consideração, na variante metodológica, de outros períodos críticos com características distintas do único período crítico encontrado na série histórica de aflúncias.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Portaria MME n° 303 de 18 de novembro de 2004.
- [2] CEPEL, "Manual de Referência do Modelo SUIISHI-O", Relatório Técnico DP/DEA n° 53041/06, 2006.
- [3] MACEIRA, M.E.P., SUANO, C.M., COSTA, J.P., *Modelo estratégico de geração hidrotérmica a subsistemas – NEWAVE – especificação funcional*, Relatório Técnico CEPEL 1003/93, 1993.
- [4] ELETROBRAS, Manual do modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – MSUI, 1999.
- [5] MACEIRA, M.E.P., BEZERRA, C.V., 1997, Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems, In *Proceedings of 5th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pp. 305-310, Vancouver, Canada.