



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

LEVANTAMENTO DAS DIFERENÇAS NUMÉRICAS E METODOLÓGICAS ENTRE OS MODELOS SUISHI E NEWAVE

**Fabio Rodrigo Siqueira Batista¹ Maria Elvira Piñeiro Maceira^{1,2} André Luiz Marques Marcato³
Vitor Silva Duarte¹**

¹ CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

² UERJ – UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

³ UFJF – UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

RESUMO

O modelo SUISHI se caracteriza como um simulador a usinas hidrelétricas individualizadas, a partir de uma política ótima de operação calculada pelo modelo NEWAVE, desagregando os resultados encontrados pelo modelo NEWAVE para subsistemas equivalentes. Inicialmente, espera-se que os resultados de ambos os modelos sejam muito próximos, entretanto, observa-se que em determinados estágios esses resultados divergem mais do que o esperado. Sendo assim, destaca-se como objetivo deste trabalho a comparação dos resultados obtidos pelos modelos SUISHI e NEWAVE, buscando-se detalhar e justificar quaisquer diferenças metodológicas ou numéricas que possam levar a diferentes resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento da Operação Energética, Simulação a Usinas Individualizadas, Modelo SUISHI, Modelo NEWAVE.

1.0 - INTRODUÇÃO

No Sistema Elétrico Brasileiro há participação majoritária da hidroeletricidade no atendimento ao consumo de energia elétrica. As usinas hidrelétricas que compõem o parque gerador nacional estão localizadas ao longo de cascatas em bacias hidrográficas com comportamento hidrológico bastante variável. Ademais, há várias usinas que possuem capacidade de regularização plurianual. Sendo assim, para viabilizar o trabalho do planejador, é necessário racionalizar a utilização dos recursos computacionais, dividindo o estudo em diversos horizontes temporais, desde estudos de médio prazo, com horizontes variando de 5 a 10 anos e discretização mensal, até a programação diária da operação, determinados em base horária [1].

Um dos objetivos do planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro é determinar uma operação estratégica que, para cada período do planejamento, produza metas de geração para as usinas do sistema de forma a minimizar o custo total de operação ao longo do horizonte de planejamento. Neste trabalho, o modelo NEWAVE é utilizado na etapa de planejamento energético de médio prazo do sistema interligado nacional. Apesar deste modelo considerar características complexas do sistema, tal como a estocasticidade das vazões naturais afluentes às usinas, algumas simplificações do problema real foram adotadas para viabilizar computacionalmente a sua utilização. Uma delas é o agrupamento das usinas hidrelétricas de um mesmo subsistema em reservatórios equivalentes de energia. Tais reservatórios são interligados eletricamente, representando os grandes troncos de linhas de transmissão entre os diversos subsistemas elétricos do sistema brasileiro [2].

Uma vez que os resultados do modelo NEWAVE são determinados a subsistemas equivalentes de energia, pode ser necessária a obtenção de metas de geração individualizadas para as usinas hidrelétricas. Neste contexto, o modelo SUISHI [3], desenvolvido pelo Cepel, pode ser caracterizado como um modelo de simulação a usinas

hidrelétricas individualizadas que operam em um sistema hidrotérmico interligado, tal como o sistema brasileiro. O processo de solução deste modelo é dividido em duas etapas. A primeira etapa consiste na otimização do balanço hidrotérmico entre subsistemas equivalentes, determinando-se a geração hidráulica e térmica e os intercâmbios de energia com base na política de operação definida pelo modelo NEWAVE (contida na função de custo futuro de cada mês). A segunda etapa diz respeito ao processo de simulação à usinas hidrelétricas individualizadas, cujo objetivo é operar as usinas hidrelétricas dos subsistemas atendendo às metas agregadas de geração definidas na primeira etapa de solução do problema.

Ao final da etapa de simulação, duas situações distintas podem ser observadas: (i) o atendimento das metas de geração hidráulica provenientes do módulo de otimização do modelo SUIISHI. Neste caso o modelo passa para o próximo estágio; (ii) o não atendimento das metas de geração hidráulica, definidas na primeira etapa, ocasionado por um déficit ou um excesso na soma da geração hidráulica individualizada. Nestes casos, o modelo SUIISHI irá realimentar o módulo de otimização procurando redefinir a meta de geração hidráulica máxima (em caso de déficit de geração) ou de energia armazenada máxima (em caso de excesso de geração) de tal forma que o módulo de simulação consiga atender as metas oriundas do módulo de otimização do modelo. É importante observar que em cada estágio do problema de planejamento, o modelo SUIISHI utiliza a função de custo futuro previamente determinada pelo modelo NEWAVE.

Partindo da premissa que tanto o modelo SUIISHI quanto o modelo NEWAVE planejam a operação do sistema a partir da mesma base de dados, e que o primeiro modelo desagrega pelas usinas hidroelétricas os resultados do segundo, espera-se que os resultados de ambos os modelos sejam muito próximos. Entretanto, o que se observa é que em determinados estágios esses resultados podem não ser coincidentes.

Neste contexto, destaca-se como objetivo deste trabalho a comparação dos resultados obtidos pelos modelos SUIISHI e NEWAVE a partir de uma mesma base de dados, buscando-se detalhar e justificar quaisquer diferenças metodológicas ou numéricas que possam levar a diferentes resultados destes modelos. Os resultados apresentados neste trabalho se referem à série hidrológica de 1952, entretanto, resultados complementares referentes a todo o histórico de vazões podem ser encontrados em [4].

2.0 - PREMISSAS ADOTADAS

Nesta seção, os resultados obtidos a partir da utilização dos modelos SUIISHI e NEWAVE, sobre uma mesma base de dados, serão apresentados e analisados. O objetivo desta análise é observar se existem diferenças significativas entre os resultados encontrados, justificando uma análise mais aprofundada das possíveis causas destas diferenças.

Para a realização das análises sugeridas nesta seção utilizou-se a versão 6.11 do modelo SUIISHI assim como a versão 13a do modelo NEWAVE. Adicionalmente, os dados do estudo foram baseados no Plano Mensal de Operação (PMO) do mês de março de 2008. Com o objetivo de evitar divergências de resultados devido a diferenças metodológicas já conhecidas e justificadas entre os modelos SUIISHI e NEWAVE, as seguintes simplificações foram realizadas:

- Configuração Estática para o SIN

As análises foram realizadas considerando uma configuração estática para o sistema (configuração inicial do PMO de março de 2008). Esta simplificação na plataforma de dados evita que sejam observadas diferenças de resultados devido ao cálculo do tempo de enchimento do volume morto das usinas hidráulicas que fazem parte da expansão do Sistema Interligado Nacional.

Neste caso, é importante ressaltar que, como modelo NEWAVE não determina a operação das usinas individualizadamente, assume-se como premissa que o enchimento do volume morto se dá em um tempo médio determinístico. Por outro lado, esta variável, no modelo SUIISHI, dependerá da operação individualizada das usinas, que por sua vez estarão sujeitas, entre outros fatores, a uma hidrologia estocástica.

- Desconsideração dos Desvios d'água

O tratamento dado aos desvios d'água é distinto no processo de solução dos modelos SUIISHI e NEWAVE. Uma vez que o modelo SUIISHI simula a operação das usinas hidrelétricas individualizadamente, neste modelo as vazões de desvio são simplesmente subtraídas das vazões incrementais no início de cada mês do período de simulação considerado, tratando-se os desvios d'água apenas na etapa de "simulação". Por outro lado, o modelo NEWAVE trata os desvios d'água como variáveis de decisão do problema de otimização solucionado, sendo as violações a esse requisito penalizadas na função objetivo do problema [5].

- Consideração de um Único Subsistema Equivalente

Baseado no caso PMO de março de 2008, uma configuração especial foi adotada para os testes realizados neste documento, onde o Sistema Interligado Nacional é reduzido a apenas um único subsistema equivalente. Esta configuração foi escolhida por estar sendo atualmente adotada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico no processo de validação do modelo SUIISHI, além de simplificar as análises realizadas pelos modelos na medida em que a variável “intercâmbios de energia” deixa de ser uma variável de decisão no problema de otimização do balanço hidrotérmico entre subsistemas.

3.0 - ANÁLISE PRELIMINAR

A partir da plataforma de dados descrita anteriormente, utilizou-se os modelos SUIISHI e NEWAVE para planejar a operação do sistema interligado nacional (SIN) dentro do horizonte de março de 2008 a dezembro de 2012. Neste caso, as variáveis observadas foram: Geração Hidráulica Total, Custo Marginal de Operação, Energia Armazenada Final dos reservatórios, e Geração Térmica Total do sistema. Estas variáveis foram escolhidas por se entender que diferenças significativas nos resultados dos modelos SUIISHI e NEWAVE poderiam ser percebidos por meio de sua análise. Os resultados encontrados para a série hidrológica de 1952 se encontram ilustrados na Figura 1.

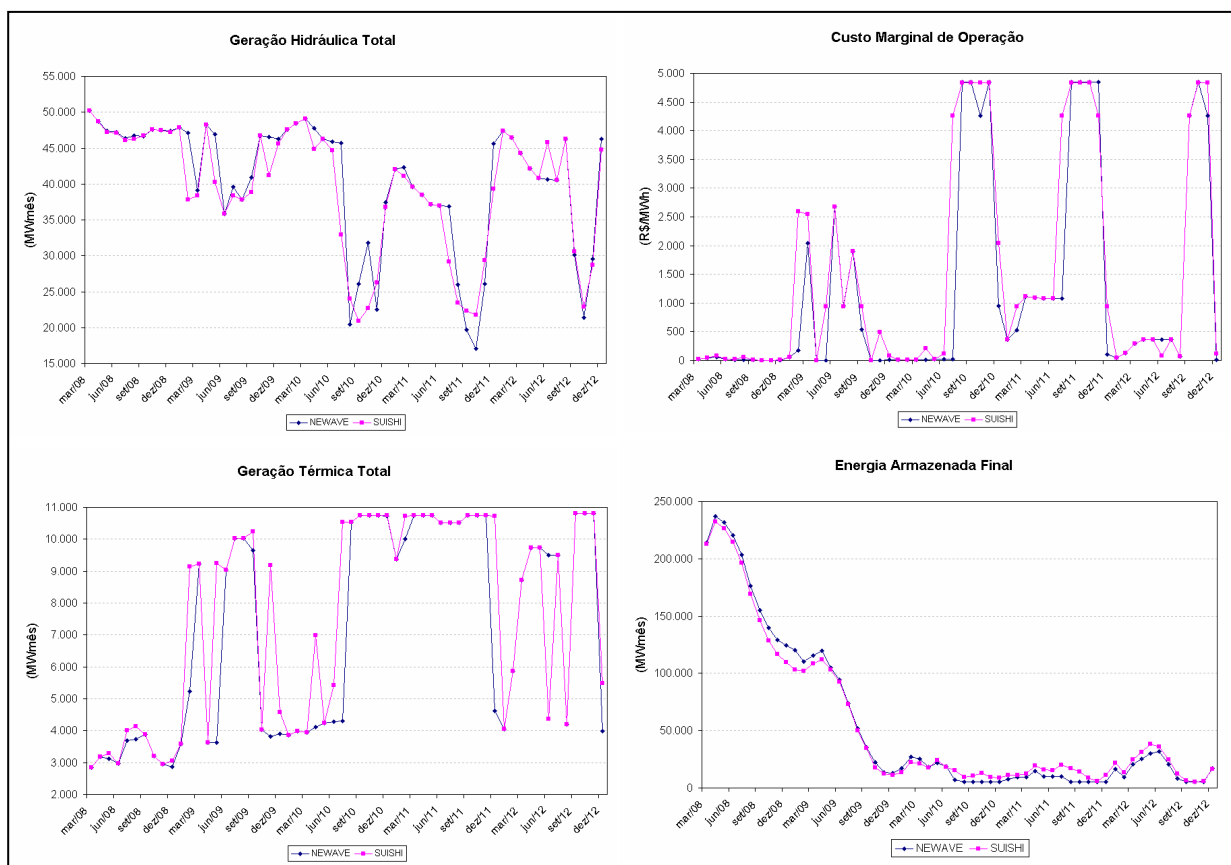


Figura 1 – Comparação Inicial dos Resultados dos Modelos SUIISHI e NEWAVE para a série 1952.

Conforme o ilustrado na Figura 1, observa-se que para todas as variáveis observadas os resultados do modelo SUIISHI são compatíveis com os resultados fornecidos pelo modelo NEWAVE. Por exemplo, analisando as metas de geração hidráulica agregadas, nota-se que os resultados destes modelos apontam de forma sincronizada períodos de alta e baixa geração no sistema. O mesmo pode ser observado para as demais variáveis ilustradas. Para as demais séries do histórico, as diferenças entre os resultados dos dois modelos foram ainda menores que as observadas na Figura 1 [4].

Na próxima seção, as diferenças metodológicas entre os modelos serão listadas. Essas diferenças justificam os descolamentos das curvas observados nos resultados da Figura 1.

4.0 - LEVANTAMENTO DAS DIFERENÇAS METODOLÓGICAS ENTRE OS MODELOS SUSHI E NEWAVE

Neste capítulo serão detalhadas as principais diferenças numéricas e metodológicas entre os modelos SUSHI (versão 6.11) e NEWAVE (versão 13a). Para tanto, é necessário relembrar que o processo de solução do modelo SUSHI é composto por duas etapas: uma etapa de otimização do balanço mensal de energia entre subsistemas, a qual é praticamente idêntica ao problema resolvido pelo modelo NEWAVE na etapa de simulação, e a etapa de simulação à usinas individualizadas, onde a operação mensal das usinas hidrelétricas de cada subsistema é simulada. Esta etapa é inexistente no modelo NEWAVE.

Uma vez colocada a principal diferença entre os dois modelos, quatro outros pontos podem ser destacados:

- Cálculo da Energia Natural Afluente

A energia natural afluente aos subsistemas que compõem o SIN pode ser obtida pela soma de três parcelas: a energia controlável, a energia a fio d'água e a energia de vazão de mínima. Tanto no modelo SUSHI quanto no modelo NEWAVE a forma de cálculo destas parcelas seguem o descrito pelas equações (1), (2) e (3) a seguir:

$$EC_S = \sum_{i \in R} (Q_i - QMIN_i) \left(\rho_i H_i + \sum_{j \in F_i} \rho_j H_j \right) \quad (1)$$

$$EVM_S = \sum_{i \in R} QMIN_i \left(\rho_i H_i + \sum_{j \in F_i} \rho_j H_j \right) \quad (2)$$

$$EFD_S = \sum_{i \in F^*} \min \left[QINC_i \left(QMAX_i - \sum_{m \in M_i} QMIN_m \right) \right] \rho_i H_i \quad (3)$$

onde EC_S representa a Energia Controlável afluente ao subsistema S, R representa o conjunto de reservatórios deste subsistema, F representa o conjunto de usinas entre o reservatório i e o próximo reservatório a jusante, Q_i representa a descarga natural afluente ao reservatório i, $QMIN_i$ representa a descarga mínima obrigatória do reservatório i, ρ_j representa o rendimento global do conjunto turbina-gerador da usina j, R^* representa o conjunto de usinas a fio d'água, M_j representa o conjunto de usinas imediatamente a montante da usina j, $QINC_i$ representa a vazão incremental afluente à usina j, $QMAX_j$ representa o engolimento máximo da usina j, e, finalmente, H_i representa a altura de queda líquida da usina i.

Apesar das equações empregadas pelos dois modelos serem as mesmas, o cálculo das produtibilidades acumuladas se dá de forma diferenciada. Como no modelo NEWAVE a energia natural afluente é obtida *a priori*, durante a etapa de cálculo do sistema equivalente, essas são calculadas considerando que os reservatórios se encontram a uma altura correspondente a 65% dos seus respectivos volumes úteis. Durante o cálculo da política de operação e simulação final, essas energias são ajustadas através de parábolas de correção. Por outro lado, o modelo SUSHI considera o valor deste parâmetro obtido em decorrência da operação da própria usina e das demais usinas da cascata.

- Uso de Parábolas de Correção

Conforme descrito anteriormente, uma vez que os modelos SUSHI e NEWAVE utilizam formas distintas para o cálculo da produtividade acumulada referente a cada usina, o valor das Energias Controlável, de Vazão Mínima e de Evaporação determinadas por estes modelos são diferentes entre si. No caso específico do modelo NEWAVE, as parábolas de correção são empregadas para transformar o valor dessas energias, calculadas para uma altura correspondente a 65% do volume útil dos reservatórios, em valores correspondentes a altura real de operação. Sendo assim, são três as parábolas de correção empregadas pelo modelo NEWAVE:

- ✓ Parábola Referente à Energia Controlável: é caracterizada por uma função que relaciona um fator de correção da energia controlável (calculada a 65%) à energia armazenada inicial do subsistema equivalente;
- ✓ Parábola Referente à Energia de Vazão Mínima: é caracterizada por uma função que relaciona a energia de vazão mínima (calculada a 65%) à energia armazenada inicial do subsistema equivalente;
- ✓ Parábola Referente à Energia Evaporada: é caracterizada por uma função que relaciona energia evaporada nos reservatórios à energia armazenada inicial do subsistema equivalente.

Esquemáticamente, o uso das parábolas de correção no modelo NEWAVE se encontra representada na Figura 2.

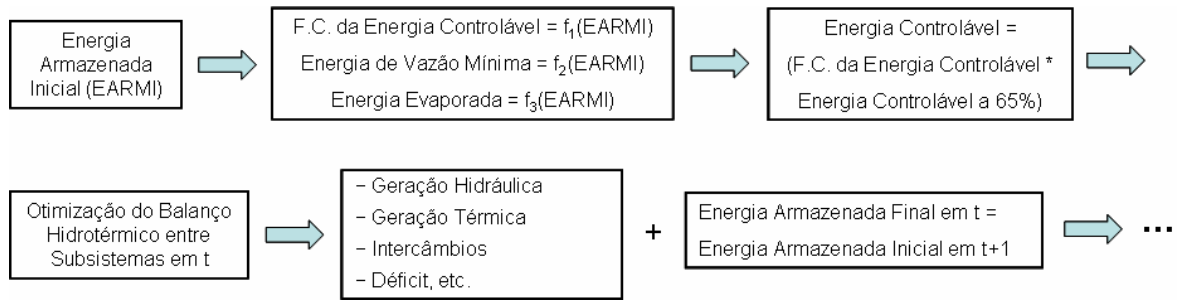


Figura 2 – Esquema de Utilização das Parábolas de Correção no Modelo NEWAVE

A partir da energia armazenada inicial calculada no início do horizonte de planejamento, considerando a altura real dos reservatórios, o uso das parábolas de correção fornece a energia de vazão mínima e a energia evaporada correspondente à altura de operação num dado momento. Além disso, também é obtido o fator de correção da energia controlável que, quando aplicado ao valor da energia controlável calculado a 65% do volume útil dos reservatórios, fornece a energia controlável correspondente à altura real de operação. Os resultados encontrados através das parábolas de correção servem como entradas para o problema de otimização do balanço hidrotérmico entre subsistemas, cujas saídas realimentam este processo.

Uma vez que o modelo SUIISHI opera as usinas hidrelétricas individualizadamente, e, conseqüentemente, conhece o nível real de cada reservatório durante o período de planejamento, não é necessária a utilização de parábolas de correção.

- Engolimento Máximo das Usinas Fio d'água

Para o modelo SUIISHI, o engolimento máximo das usinas a fio d'água é calculado da seguinte forma:

$$QFIO_i = QNOM_i = \sum_{CJ_i} (QEFCJ * NMAQCJ) \quad (4)$$

onde $QFIO_i$ representa o engolimento máximo da usina i , $QNOM_i$ é a vazão nominal da usina i , CJ_i representa o conjuntos de máquinas da usina i , $QEFCJ$ representa a vazão efetiva do conjunto de máquinas considerado, e $NMAQCJ$ representa o número de máquinas do conjunto considerado.

Por outro lado, o cálculo do engolimento máximo no modelo NEWAVE é realizado de forma distinta, seguindo a seguinte equação:

$$QFIO_i = \frac{\left(\sum_{CJ_i} (PEFCJ * NMAQCJ) \right)}{\rho_i * H_i} \quad (5)$$

onde $PEFCJ$ representa a potência efetiva do conjunto de máquinas considerado, ρ_i representa o rendimento global do conjunto turbina-gerador da usina i , e H_i representa a altura de queda líquida da usina i .

- Precisão Numérica do Fator de Capacidade Máximo das UHEs

Apesar de não existir diferenças no valor do fator de capacidade máximo utilizado pelos modelos SUIISHI e NEWAVE para as usinas hidrelétricas, a precisão adotada para essa variável é diferente. Apesar de ser pouco significativa, esta diferença de aproximação numérica contribui para que os resultados dos modelos sejam diferentes, principalmente devido à presença de usinas hidrelétricas com grande capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional.

5.0 - RESULTADOS

Com o objetivo de contribuir para o aperfeiçoamento do modelo SUIISHI, verificando a sua aderência com a metodologia empregada no modelo NEWAVE e demonstrando que, salvo os pontos destacados nas seções anteriores, não existem outras fontes que justifiquem as desigualdades de resultados entre os modelos, decidiu-se adaptar o modelo SUIISHI de forma a eliminar as diferenças metodológicas anteriormente citadas. As adaptações realizadas foram as seguintes:

- ✓ exclusão do módulo de simulação a usinas hidrelétricas individualizadas do modelo SUIHI. Esta alteração faz com que os resultados do modelo tenham origem apenas no seu módulo de otimização, cuja formulação espera-se que seja compatível com a formulação do problema resolvido pelo NEWAVE;
- ✓ cálculo da Energia Natural Afluente aos subsistemas equivalentes considerando a altura de queda líquida das usinas igual a 65% do volume útil dos seus respectivos reservatórios;
- ✓ utilização de parábolas de correção para a determinação do fator de correção da energia controlável, da energia de vazão mínima e da energia evaporada dos reservatórios.
- ✓ utilização da mesma equação empregada pelo modelo NEWAVE para a determinação do engolimento máximo das usinas fio d'água;
- ✓ consideração da mesma precisão numérica utilizada no modelo NEWAVE para o fator de capacidade máximo das usinas hidrelétricas.

Considerando as adaptações descritas anteriormente, novamente os resultados obtidos pelo modelo SUIHI foram comparados com os resultados do modelo NEWAVE. Os resultados para a série de 1952 se encontram ilustrados na Figura 3.

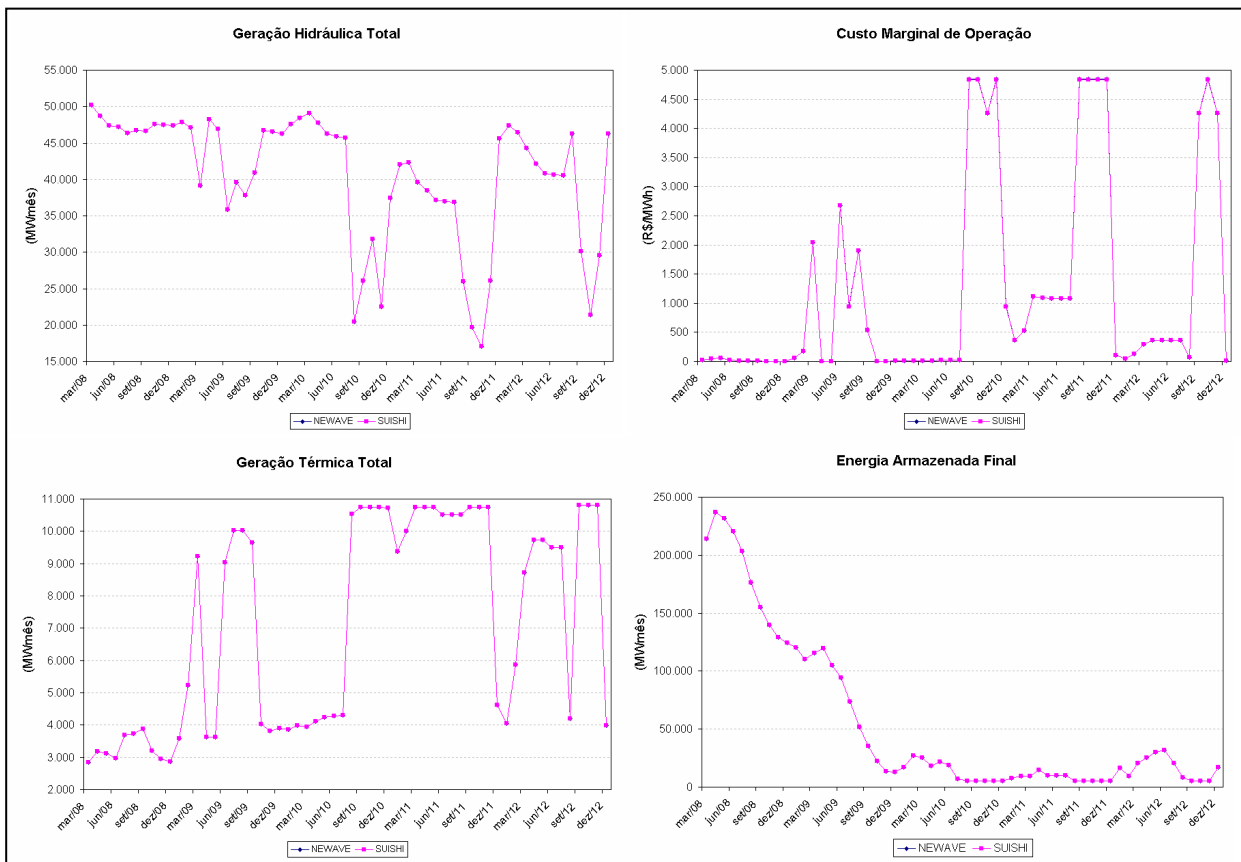


Figura 3 – Comparação dos Resultados dos Modelos SUIHI “Adaptado” e NEWAVE para a série de 1952

Estes resultados mostram que a solução encontrada pelo modelo “SUIHI ajustado” é igual a solução obtida pelo modelo NEWAVE, independente da variável observada. Estes resultados corroboram com a ideia de que as diferenças encontradas nos resultados apresentados na seção 2 se devem às diferenças metodológicas destacadas neste trabalho, as quais, em sua maioria, são intrínsecas ao problema resolvido por cada um dos modelos.

6.0 - CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar uma comparação dos resultados obtidos pelos modelos SUIHI e NEWAVE, dada uma mesma base de dados, com o intuito de justificar quaisquer diferenças que pudessem ser observadas. Tais análises foram realizadas com base nos dados do PMO de março de 2008, usando-se os modelos SUIHI versão 6.11 e NEWAVE versão 13a.

Com o objetivo de evitar desigualdades de resultados devido a diferenças metodológicas já conhecidas entre os modelos SUIISHI e NEWAVE, algumas simplificações foram realizadas nos dados originais do PMO de março de 2008, sendo elas as seguintes:

- utilização de configuração estática para o SIN: esta simplificação evitou que fossem observadas diferenças de resultados devido à diferença no cálculo do tempo de enchimento do volume morto das usinas hidráulicas que fazem parte da expansão do Sistema Interligado Nacional;
- desconsideração dos desvios d'água: esta simplificação evita que sejam observadas diferenças de resultados na medida em que no modelo SUIISHI as vazões de desvio são subtraídas das vazões incrementais no início de cada mês do período de simulação considerado, enquanto o modelo NEWAVE trata os desvios d'água como parte do problema de otimização do balanço hidrotérmico.

Adicionalmente, foi considerado um único subsistema equivalente no SIN com o objetivo de simplificar as análises realizadas, na medida em que a variável "intercâmbios de energia" deixa de ser considerada.

Além dos pontos mencionados anteriormente, também foi verificado que outras diferenças metodológicas influenciam nos resultados, sendo elas as seguintes:

- existência do módulo de simulação à usinas individualizadas do modelo SUIISHI, o que torna o problema final resolvido pelo este modelo mais restrito do que o resolvido pelo modelo NEWAVE;
- cálculo diferenciado da Energia Natural Afluente aos subsistemas;
- cálculo diferenciado das energias controlável, de vazão mínima, e energia evaporada dos reservatórios;
- cálculo diferenciado do engolimento máximo das usinas fio d'água;
- precisão numérica diferenciada ao se utilizar o fator de capacidade máximo das usinas hidrelétricas.

Finalmente, eliminadas as diferenças mencionadas anteriormente, os resultados passaram a ser iguais. Concluiu-se que as fontes mais relevantes de diferenças de resultados entre os modelos são caracterizadas pela individualização dos resultados agregados fornecidos pelo módulo de otimização no modelo SUIISHI, pelas diferenças no cálculo da energia natural afluente aos subsistemas e pela utilização de parábolas de correção no modelo NEWAVE para o cálculo das energias controlável, de vazão mínima e evaporada nos reservatórios. Tais diferenças têm fundamento metodológico e o seu tratamento não poderia ser uniformizado sem que houvesse prejuízo no alcance dos objetivos individuais de cada modelo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Maceira, M.E.P.; Terry, L.A.; Costa, F.S.; Damázio, J.M.; Melo, A.C.G. **Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System**, 14^o PSCC, Sevilla, Espanha, 2002.
- [2] Maceira, M. E. P. ; Duarte, V. S. ; Penna, D. D. J. ; Moraes, L. A. M. ; Melo, A. C. G. . **Ten years of application of stochastic dual dynamic programming in official and agent studies in Brazil description of the NEWAVE program**. In: 16th Power Systems Computation Conference, 2008, Glasgow.
- [3] Maceira, M.E.P., Marcato, A.L.M., Batista, F.R.S., **Manual de Referência do Modelo SUIISHI**, Relatório Técnico CEPEL DP/DEA – 47723/08, 2008.
- [4] Batista, F.R.S., Maceira, M.E.P., Marcato, A.L.M., Duarte, V.S., Soares, T., **Levantamento das Diferenças Numéricas e Metodológicas entre os Modelos SUIISHI e NEWAVE**, Relatório Técnico CEPEL, DP/DEA 46159/08.
- [5] Projeto Newave, **Inclusão de Restrições de Desvio de Água Variável no Cálculo da Política de Operação do NEWAVE**, Nota Técnica nº 10 CEPEL, Outubro de 2003.

8.0 - AGRADECIMENTO

Os autores agradecem as contribuições da colega Tatiana Rodrigues Soares no desenvolvimento deste trabalho.