



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

GPL - 05
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

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

**AValiação DO GANHO ENERGÉTICO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL
DEVIDO A OPERAÇÃO CENTRALIZADA**

Fabiano Salomão de Oliveira Flavio Corga Cardinot* Lilian Laubenbacher Sampaio

Márcio Gomes Catharino Paulo Fernando Vieira Souto Rezende Renato Santos de Almeida

RESUMO

O presente Informe Técnico reavalia os estudos dos anos 90 realizados para os subsistemas Sul/Sudeste/Centro-Oeste, à luz da nova configuração do parque gerador e das interligações entre subsistemas, calculando as perdas energéticas em decorrência da operação descentralizada de cada subsistema.

A partir de simulações estáticas utilizando o Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – MSUI, desenvolvido pela ELETROBRÁS são apresentadas comparações entre as alternativas de operação integrada do SIN e da operação descentralizada de cada subsistema, para diversos parâmetros o que permitirá avaliar o ganho energético do SIN em decorrência da operação centralizada dos subsistemas elétricos.

PALAVRAS-CHAVE

Ganho Energético. Operação Centralizada.

1.0 - INTRODUÇÃO

Desde meados da década de 70, o sistema eletroenergético brasileiro é operado de forma coordenada, visando obter ganhos sinérgicos, minimizando os custos globais de produção de energia elétrica.

No Brasil, a maior parte da capacidade instalada é composta por usinas hidrelétricas, que se distribuem em 8 diferentes bacias hidrográficas nas regiões geográficas do País.

Quando se opera um sistema com cerca de cem usinas hidrelétricas, com e sem reservatório, em cascata e em paralelo, existem infinitas maneiras de estocar água nos diversos reservatórios disponíveis. Ou seja, quando uma usina com reservatório regulariza uma bacia, os benefícios são incorporados não só na própria usina, como em todas as usinas que estão na bacia.

Portanto, a operação de um sistema predominantemente hidrelétrico, com regularização plurianual, deve ser integrada, pois quando uma usina com reservatório regulariza uma bacia os benefícios são incorporados não só a própria usina, como em todas as usinas que estão na bacia, buscando-se a operação ótima global do sistema, e não cada empresa objetivando a operação ótima de suas usinas como se não houvesse dependência com as demais usinas, ou seja, cabe a uma coordenação central definir:

* Divisão de Estudos Energéticos/Departamento de Estudos Energéticos e Mercado
Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - ELETROBRÁS
Praia do Flamengo, 66 - Bloco A - CEP 22210-903 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
Tel.: (021) 2514-5736 - Fax: (021) 2514-5948 - e-mail: cardinot@eletrobras.com

- Que o reservatório a ser construído deverá ter dimensões ideais para o sistema, regularizando todo o trecho de rio, e não com dimensões mínimas necessária exclusivamente para regularizar a própria usina.
- A operação do reservatório para o sistema, gerando, não gerando ou mesmo vertendo, de forma a maximizar a energia obtida em todo o trecho do rio, e não apenas na usina correspondente.

No início dos anos 90, a ELETROBRÁS editou as Informações Técnicas DPE/DPEP-054/93 e DPE/DPEP-002/94 que enfocaram o ganho de energia obtido pela operação interligada dos subsistemas Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Em ambas os resultados indicaram um ganho em torno de 18 % para a operação interligada dos referidos subsistemas.

Com a evolução do Sistema Interligado Nacional - SIN, interligando os subsistemas Norte e Nordeste aos subsistemas Sul, Sudeste e Centro-Oeste, novas bacias, principalmente das regiões Norte e Nordeste, foram agregadas aumentando a diversidade hidrológica entre os subsistemas, indicando a possibilidade de aumento do ganho energético.

Este Informe Técnico apresenta os resultados das simulações utilizando o Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – MSUI, desenvolvido pela ELETROBRÁS, e o Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes - NEWAVE, desenvolvido pelo CEPEL, para a operação centralizada comparando com os resultados da operação individual de cada subsistema.

2.0 - DADOS BÁSICOS

A partir de uma configuração de médio prazo (15 anos) foram efetuadas simulações, com os modelos MSUI e NEWAVE, para o Sistema Interligado Nacional como um todo e para cada subsistema individualmente.

As características da configuração do sistema elétrico foram baseadas no IT DEM/DEME-025/2004 “Programa de Expansão da Oferta no SIN para o Horizonte 2004-2014 – 2ª Revisão 2004”, que apesar de só ter divulgado os resultados para o período decenal, teve como horizonte de simulação o período 2004-2019.

As principais características deste sistema elétrico são:

- Parque gerador em 2019 com 118.022 MW de hidrelétricas e 40.804 MW de termelétricas;
- Oito subsistemas representados: Sul, Sudeste/Centro-Oeste(incluindo Itaipu), Nordeste, Norte, Belo Monte, Acre/Rondonia, Manaus/Amapá e Madeira;
- Critério de ajuste da oferta para igualdade do CMO = CME, em 30 US\$/MWh, nos dez primeiros anos e de 35 US\$/MWh para os últimos cinco anos.

3.0 - MODELOS DE SIMULAÇÃO

O Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – MSUI, desenvolvido na Eletrobrás, em sua versão 3.0, executável na plataforma Windows para qualquer sistema operacional do mesmo, permite simular a operação de um sistema constituído de usinas hidrelétricas, sob diversas condições de carga e hidraulicidade, subordinadas a um conjunto de parâmetros definidores de prioridades de esvaziamento/armazenamento, através de faixas paralelas num total de 20.

O Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes – NEWAVE, desenvolvido pelo CEPEL, em sua versão 11.2, objetiva determinar as estratégias da operação hidrotérmica a longo prazo, com representação agregada do parque hidroelétrico e cálculo da política ótima, baseado em Programação Dinâmica Dual Estocástica, com as características de múltiplos subsistemas interligados, configuração estática ou dinâmica, modelo equivalente com produtividade variável e energias afluentes modeladas por um processo auto-regressivo periódico de ordem p .

4.0 - ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM O MODELO MSUI

Os estudos foram desenvolvidos três alternativas, a saber:

4.1 Alternativa 1

Utilizando o modelo MSUI foram realizadas simulações estáticas operando o SIN integrado, representando a operação centralizada, e cada subsistema independente, representando a operação descentralizada, adotando o período crítico de junho de 1949 a novembro de 1956.

Os resultados das simulações são mostrados nas Tabelas 1 e 2, a seguir :

TABELA 1
Resultados da Alternativa 1 utilizando o Modelo MSUI

	Energia Armaz. Máxima	Carga Crítica	Energia Firme	Energia Média
	MWmed	MWmed	MWmed	MWmed
<u>Operação Integrada</u>				
SIN	381.069	58.009	60.177	65.615
<u>Operação Descentralizada</u>				
SE/CO	235.280	28.178	29.768	33.331
Sul	28.550	6.712	7.630	8.654
Nordeste	80.850	6.221	6.435	6.548
Norte	35.055	6.187	6.971	7.746
Belo Monte	7	440	4.490	4.733
Acre/Rondônia	550	129	136	135
Manaus/Macapá	777	174	191	176
Madeira	0	1.047	4.182	4.264
Total	381.069	49.088	59.802	65.587
(SIN-Total) (MWmed)	0	8.921	375	28
(SIN-Total)/Total (%)	0,0%	18,2%	0,6%	0,0%

TABELA 2
Resultados da Alternativa 1 utilizando o Modelo MSUI

	Produção Máxima		Produção Máxima		Déficit Máximo		Déficit Máximo	
	Histórico		Simult. Histórico		Histórico		Simult. Histórico	
	MWmed	Data	MWmed	Data	MWmed	Data	MWmed	Data
<u>Operação Integrada</u>								
SIN	98.301	(03/83)	98.301	(03/83)	13.662	(11/55)	13.662	(11/55)
<u>Operação Descentralizada</u>								
SE/CO	49.059	(03/91)	48.856	(03/83)	6.696	(11/55)	6.696	(11/55)
Sul	14.132	(09/73)	13.872	(03/83)	5.526	(05/52)	0	(11/55)
Nordeste	9.804	(04/81)	9.551	(03/83)	5.385	(10/99)	1.336	(11/55)
Norte	10.446	(02/67)	9.543	(03/83)	3.277	(11/52)	1.440	(11/55)
Belo Monte	9.450	(06/67)	9.387	(03/83)	240	(10/69)	0	(11/55)
Acre/Rondônia	272	(04/34)	132	(03/83)	97	(09/98)	0	(11/55)
Manaus/Macapá	307	*	72	(03/83)	156	(11/32)	0	(11/55)
Madeira	6.702	*	6.702	(03/83)	202	(09/94)	0	(11/55)
Total	100.172	-	98.115	(03/83)	21.580	-	9.472	(11/55)
(SIN-Total) (MWmed)	-1.871	-	186	-	-7.917	-	4.190	-
(SIN-Total)/Total (%)	-1,9%	-	0,2%	-	-36,7%	-	44,2%	-

* Mais de uma ocorrência no período histórico

Nas simulações descentralizadas, no intuito de que a soma das energias armazenáveis máximas dos subsistemas fosse igual à energia armazenável máxima do SIN na operação centralizada, foi adotado o seguinte procedimento:

- Todas as usinas com reservatório de uma cascata que prossegue para outro subsistema foram transformadas em reservatórios sem motorização no subsistema de jusante, mantendo a ordem da cascata.

4.2 Alternativa 2

Nesta Alternativa foram realizadas as mesmas simulações da Alternativa 1, com a seguinte modificação: não foram criados os reservatórios sem motorização nos subsistemas de jusante.

Ao invés disso, para cada última usina de um subsistema que aponta para outro subsistema foi criada uma usina no subsistema de jusante sem motorização e sem reservatório, sendo que seu posto de vazões foi criado com as vazões defluentes dessa usina completa simulada anteriormente no subsistema de montante.

Dessa maneira, as simulações obedeceram uma ordem onde os “subsistemas de montante” foram simulados anteriormente aos “subsistemas de jusante”.

Os resultados das simulações são mostrados nas Tabelas 3 e 4, a seguir :

TABELA 3
Resultados da Alternativa 2 utilizando o Modelo MSUI

	Energia Armaz. Máxima MWmed	Carga Crítica MWmed	Energia Firme MWmed	Energia Média MWmed
<u>Operação Integrada</u>				
SIN	381.069	58.009	60.177	65.615
<u>Operação Descentralizada</u>				
SE/CO	233.146	28.121	29.740	33.329
Sul	28.550	6.712	7.630	8.654
Nordeste	46.173	5.686	6.054	6.286
Norte	9.620	4.521	6.429	7.201
Belo Monte	7	440	4.490	4.733
Acre/Rondônia	550	129	136	135
Manaus/Macapá	777	174	191	176
Madeira	0	1.047	4.182	4.264
Total	318.823	46.831	58.851	64.778
(SIN–Total) (MWmed)	62.246	11.178	1.326	837
(SIN–Total)/Total (%)	19,5%	23,9%	2,3%	1,3%

TABELA 4
Resultados da Alternativa 2 utilizando o Modelo MSUI

	Produção Máxima Histórico		Produção Máxima Simult. Histórico		Déficit Máximo Histórico		Déficit Máximo Simult. Histórico	
	MWmed	Data	MWmed	Data	MWmed	Data	MWmed	Data
<u>Operação Integrada</u>								
SIN	98.301	(03/83)	98.301	(03/83)	13.662	(11/55)	13.662	(11/55)
<u>Operação Descentralizada</u>								
SE/CO	49.060	(03/91)	48.856	(03/83)	6.542	(11/55)	6.542	(11/55)
Sul	14.132	(09/73)	13.872	(03/83)	5.526	(05/52)	0	(11/55)
Nordeste	9.823	(03/41)	9.550	(03/83)	4.791	(10/99)	775	(11/55)
Norte	10.535	(01/75)	9.610	(03/83)	2.190	(11/52)	585	(11/55)
Belo Monte	9.450	(06/67)	9.387	(03/83)	240	(10/69)	0	(11/55)
Acre/Rondônia	272	(04/34)	132	(03/83)	97	(09/98)	0	(11/55)
Manaus/Macapá	307	*	72	(03/83)	156	(11/32)	0	(11/55)
Madeira	6.702	*	6.702	(03/83)	202	(09/94)	0	(11/55)
Total	100.281	-	98.181	(03/83)	19.745	-	7.903	(11/55)
(SIN–Total) (MWmed)	-1.980	-	120	-	-6.083	-	5.759	-
(SIN–Total)/Total (%)	-2,0%	-	0,1%	-	-30,8%	-	72,9%	-

* Mais de uma ocorrência no período histórico

4.3 Alternativa 3

Nesta Alternativa foram realizadas as mesmas simulações da Alternativa 1 sendo que foi calculado o período crítico para o SIN e para cada subsistema simulado descentralizadamente.

Para os subsistemas Belo Monte e Madeira foram considerados os mesmos resultados da Alternativa 1, uma vez que não seria possível calcular o período crítico desses subsistemas pela ausência de reservatórios.

Os resultados das simulações são mostrados nas Tabelas 5 e 6, a seguir:

TABELA 5
Resultados da Alternativa 3 utilizando o Modelo MSUI

	Período Crítico Calculado	Energia Armaz. Máxima MWmed	Carga Crítica MWmed	Energia Firme MWmed	Energia Média MWmed
<u>Operação Integrada</u>					
SIN	5/1948 a 11/1956	381.069	58.154	60.817	65.644
<u>Operação Descentralizada</u>					
SE/CO	5/1951 a 11/1956	235.280	28.213	28.670	33.337
Sul	11/1942 a 12/1945	28.550	4.608	5.258	8.539
Nordeste	3/1993 a 11/2003	80.850	5.709	5.789	6.351
Norte	6/1993 a 11/1999	35.055	6.683	7.622	7.853
Belo Monte	6/1949 a 11/1956	7	440	4.490	4.733
Acre/Rondônia	7/1970 a 12/1972	550	113	113	138
Manaus/Macapá	9/1991 a 12/1992	777	158	158	178
Madeira	6/1949 a 11/1956	0	1.047	4.182	4.264
Total	-	381.069	46.973	56.283	65.393
(SIN-Total) (MWmed)	-	0	11.181	4.534	251
(SIN-Total)/Total (%)	-	0,0%	23,8%	8,1%	0,4%

TABELA 6
Resultados da Alternativa 3 utilizando o Modelo MSUI

	Produção Máxima Histórico		Produção Máxima Simult. Histórico		Déficit Máximo Histórico		Déficit Máximo Simult. Histórico	
	MWmed	Data	MWmed	Data	MWmed	Data	MWmed	Data
<u>Operação Integrada</u>								
SIN	98.301	(03/83)	98.301	(03/83)	14.691	(11/55)	14.691	(11/55)
<u>Operação Descentralizada</u>								
SE/CO	49.059	(03/91)	48.856	(03/83)	6.741	(11/55)	6.741	(11/55)
Sul	14.132	(09/73)	13.872	(03/83)	205	(06/45)	0	(11/55)
Nordeste	9.817	(04/41)	9.551	(03/83)	3.656	(11/03)	0	(11/55)
Norte	10.434	(02/67)	9.543	(03/83)	4.376	(11/52)	3.069	(11/55)
Belo Monte	9.450	(06/67)	9.387	(03/83)	240	(10/69)	0	(11/55)
Acre/Rondônia	272	(04/34)	210	(03/83)	4	(12/72)	0	(11/55)
Manaus/Macapá	307	(07/62)	72	(03/83)	138	(12/32)	0	(11/55)
Madeira	6.702	*	6.702	(03/83)	202	(09/94)	0	(11/55)
Total	100.173	-	98.193	(03/83)	15.563	-	9.811	(11/55)
(SIN-Total) (MWmed)	-1.872	-	108	-	-872	-	4.880	-
(SIN-Total)/Total (%)	-1,9%	-	0,1%	-	-5,6%	-	49,7%	-

* Mais de uma ocorrência no período histórico

5.0 - ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM O MODELO NEWAVE

Utilizando o modelo Newave, foram realizadas simulações estáticas operando o SIN integrado, representando a operação centralizada, e cada subsistema independente, representando a operação descentralizada.

O critério de convergência utilizado foi o de ajuste do mercado para a obtenção de um risco de déficit de 5% nas 2000 séries sintéticas simuladas.

Quando simulados os subsistemas separadamente ou mesmo juntos, neste caso sem intercâmbio entre os subsistemas, o modelo apresentou problemas, não chegando à convergência.

Caso novas versões do modelo NEWAVE permitam a convergência os resultados serão incorporados a este Informe Técnico.

6.0 - CONCLUSÃO

Pelos resultados da Alternativa 1 podemos comentar:

- O mercado atendido pelo SIN, na operação integrada, é 18,2 % maior que o somatório dos mercados dos subsistemas, na operação descentralizada;
- Considerando o déficit máximo mensal observado no SIN (operação integrada) versus o déficit máximo mensal ocorrido em cada subsistema na operação descentralizada tem a seguinte conta:
 - O Déficit Máximo Mensal observado no SIN (operação integrada) é de 13.662 MWmédios
 - O Somatório dos Déficits Máximos ocorridos em cada Subsistema (operação descentralizada) é de 21.580 MWmédios
 - A Diferença entre os Déficits Máximos ocorridos no SIN e o somatório dos subsistemas é de 7.917 MWmédios, o que representa 13,6% do mercado atendido pelo SIN, ou seja, para este caso, a operação integrada tem a vantagem de atender um mercado 13,6% % maior do que o atendido pela operação descentralizada.
- Na consideração de ocorrência simultânea de déficits no histórico para os subsistemas operando descentralizadamente, não existe ganho para a operação integrada.

Para a Alternativa 2 temos:

- O mercado atendido pelo SIN, na operação integrada, é 23,9 % maior que o somatório dos mercados dos subsistemas, na operação descentralizada;
- Considerando o déficit máximo mensal observado no SIN (operação integrada) versus o déficit máximo mensal ocorrido em cada subsistema na operação descentralizada tem a seguinte conta:
 - O Déficit Máximo Mensal observado no SIN (operação integrada) é de 13.662 MWmédios
 - O Somatório dos Déficits Máximos ocorridos em cada Subsistema (operação descentralizada) é de 19.745 MWmédios
 - A Diferença entre os Déficits Máximos ocorridos no SIN e o somatório dos subsistemas é de 6.083 MWmédios, o que representa 10,5% do mercado atendido pelo SIN, ou seja, para este caso, a operação integrada tem a vantagem de atender um mercado 10,5% % maior do que o atendido pela operação descentralizada.
- Na consideração de ocorrência simultânea de déficits no histórico para os subsistemas operando descentralizadamente, não existe ganho para a operação integrada.

Para a Alternativa 3 temos:

- O mercado atendido pelo SIN, na operação integrada, é 11,8 % maior que o somatório dos mercados dos subsistemas, na operação descentralizada;

- Considerando o déficit máximo mensal observado no SIN (operação integrada) versus o déficit máximo mensal ocorrido em cada subsistema na operação descentralizada tem a seguinte conta:
 - O Déficit Máximo Mensal observado no SIN (operação integrada) é de 9.052 MWmédios
 - O Somatório dos Déficits Máximos ocorridos em cada Subsistema (operação descentralizada) é de 14.979 MWmédios
 - A Diferença entre os Déficits Máximos ocorridos no SIN e o somatório dos subsistemas é de 5.927 MWmédios, o que representa 1,5% do mercado atendido pelo SIN, ou seja, para este caso, a operação integrada tem a vantagem de atender um mercado 1,5% % maior do que o atendido pela operação descentralizada.
- Na consideração de ocorrência simultânea de déficits no histórico para os subsistemas operando descentralizadamente, não existe ganho para a operação integrada.

7.0 - GLOSSÁRIO

- Período Crítico: é o intervalo tempo ao qual a configuração de usinas atende a um mercado de energia sem dispor de sobras, ou seja, é o intervalo de tempo em que o sistema passa da situação de armazenamento máximo até o armazenamento mínimo, sem déficits observados e sem reenchimentos totais;
- Carga Crítica: é o mercado de energia ao qual o sistema atende sem dispor de sobras ou déficits de energia durante o período crítico;
- Energia Firme: é a energia média gerada durante o período crítico que atende a carga crítica, ou seja, atende ao mercado sem sobras ou déficits.
- Energia Armazenável Máxima: é a máxima energia a qual o sistema pode armazenar, e que é calculada pela soma das energias geradas em cada reservatório e usinas a jusante pelo esvaziamento do mesmo.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Metodologia. MSUI – Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas. Eletrobrás – DEGE.
- (2) Projeto NEWAVE. Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes. Manual do Usuário. Versão 12. Outubro de 2004.
- (3) Rosenblat, José – Ganho de Energia na Operação Coordenada do Sistema Interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste – Informação Técnica DPE/DPEP-054/93. Dezembro de 1993.
- (4) Santos, Moacyr Pereira e Trinkenreich, Jorge – Simulação do MSUI por Operação Descentralizada. Informação Técnica DPE/DPEP-02/94. Janeiro de 1994.
- (5) Duarte, Luiz Claudio Gutierrez e Sampaio, Lilian Launbenbacher – Mercado de Oferta a 5% de Risco de Déficit de Energia. Metodologia – Informe Técnico DEM/DEME-011/2003. Maio de 2003..
- (6) Daher, Mario Jorge – Dimensionamento Energético de Usinas Hidrelétricas a Nível de Viabilidade. – Informação Técnica DPE/DPEG-026/94. Maio de 1994.