

RELATÓRIO TÉCNICO

Nº: DP/DEA – 15008/10	Nº DE PÁGINAS: 37	ANEXOS: -
-----------------------	-------------------	-----------

TÍTULO: ESTRATÉGIA DE DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA (MODELO SIMHIDR) POR BACIAS.

DEPARTAMENTO: DEPARTAMENTO DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E MEIO AMBIENTE – DEA

ÁREA DE RESPONSABILIDADE: B200

Nº DO PROJETO: 1399

DESTINATÁRIOS:

Centrais Elétricas Brasileiras S/A – ELETROBRÁS
Av. Presidente Vargas, 409 – 12º andar
20071-003 – Rio de Janeiro / RJ

ATENÇÃO: Egidio Schoenberger

EQUIPE DE ACOMPANHAMENTO:

Luis Ernesto Areias – ELETROBRÁS
Renata Leite Falcão - ELETROBRÁS

RESUMO: Neste Relatório Técnico descreve-se a metodologia de decomposição do problema de simulação hidroelétrica por “grandes bacias”, de forma a acelerar o tempo computacional para a resolução do problema de simulação hidráulica. Além de se resolver o problema de simulação como um único programa linear multi-estágio (“PL Único”), realizou-se uma decomposição do problema de acordo com a divisão do parque hidroelétrico em “grandes bacias”.
--

AUTORES:

Michel Igor de Almeida Ennes - CEPEL
André Luiz Diniz Souto Lima - CEPEL
Tiago Norbiato dos Santos - PUC

PALAVRAS-CHAVE:

Programação diária da operação, simulação hidráulica, programação linear, bacias hidroelétricas.

CLASSIFICAÇÃO: CONTROLADO

GÉRENTE DO PROJETO

NOME: André Luiz Diniz Souto Lima
TEL: (21) 2598-6046 FAX: (21) 2598-6482
EMAIL: diniz@cepel.br

CHEFE DE DEPARTAMENTO

NOME: Maria Elvira Piñeiro Maceira
TEL: (21) 2598-6454 FAX: (21) 2598-6482
EMAIL: elvira@cepel.br

APROVAÇÃO

Roberto Pereira Caldas
DIRETOR DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO
ROBERTO PEREIRA CALDAS

24 / 05 / 10

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Projeto DESSEM

Relatório Técnico:

**ESTRATÉGIA DE DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA
DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA (MODELO SIMHIDR)
POR BACIAS**

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. CONCEITUAÇÃO DO PROBLEMA DE SIMULAÇÃO DE BACIAS HIDRÁULICAS.....	3
2.1. Descrição do Problema.....	3
2.2. Estratégia de Resolução Sequencial por Período	3
2.2.1 Desvantagens da estratégia sequencial	4
2.3. Estratégia de resolução por PL Único	5
2.3.1 Desvantagem da estratégia	5
2.3.2 Propostas para redução do tempo computacional.....	5
3. DADOS PARA RESOLUÇÃO DA SIMULAÇÃO POR BACIA HIDRÁULICA	7
3.1. Validação e processamento dos Dados	7
4. ESTRATÉGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE SIMULAÇÃO POR BACIA.....	8
4.1. Desagregação do problema por bacias	8
4.1.1 Distribuição das usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN) ao longo das grandes bacias	9
4.1.2 Estratégia de decomposição do problema por bacia.....	11
4.2. Aglutinação de bacias pequenas.....	11
4.3. “Quebra” de bacias	13
4.3.1 Ordenação da simulação das sub-bacias oriundas de uma quebra	14
4.3.2 Condições para a quebra da bacia em determinada usina	15
4.3.3 Usinas de quebra para o SIN	17
4.3.4 Verificação da operação obtida para a usina de quebra.....	20
4.3.5 Considerações adicionais.....	20
5. RELATÓRIOS DE SAÍDA	21
6. ESTUDO DE CASO	22
6.1. Estudo de caso	22
6.2. Desempenho da decomposição do problema por bacia.....	23
6.3. Desempenho da agregação de pequenas bacias	23
6.4. Desempenho da quebra de bacias.....	24
6.4.1 Redução do tempo	25
6.4.2 Otimalidade da solução	26
6.5. Relatórios de Saída.....	27
7. CONCLUSÕES.....	32
8. REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

O SIMHIDR - Simulador Hidroelétrico [1] - é um programa desenvolvido pelo CEPEL - Centro de pesquisas de energia elétrica, para realizar a simulação hidroelétrica, ao longo de um horizonte de até sete dias, de um sistema composto por diversas usinas hidroelétricas em cascata. Esta simulação é feita de forma a atingir as metas de geração estabelecidas para as usinas em cada intervalo de tempo em que o horizonte de estudo é subdividido, buscando-se ainda o atendimento a um determinado conjunto de restrições hidráulicas para as usinas e os reservatórios.

No processo de utilização do modelo DESSEM [2] como ferramenta de apoio para a realização da programação diária da operação, o SIMHIDR torna-se um módulo preliminar, onde se realiza uma simulação hidráulica do sistema para os dias que antecedem o período de programação da operação.

Esta Nota Técnica descreve os aprimoramentos realizados no módulo SIMHIDR a partir de Junho de 2008, com os objetivos de acelerar o tempo computacional para a resolução do problema de simulação hidráulica. Esses aprimoramentos estão relacionados à resolução do problema como um único problema de programação linear (PPL)¹ multi-estágio, com posterior decomposição desse problema de acordo com a divisão das usinas em “grandes bacias”. As principais etapas desse trabalho foram:

Resolução do problema de simulação por “PL Único”. Na versão anterior do modelo SIMHIDR [1], a simulação era realizada individualmente para cada intervalo de tempo, de forma seqüencial, do primeiro ao último estágio. Posteriormente, passou-se a resolver o problema como um PL único, o qual envolve simultaneamente todos os intervalos de tempo. A resolução do problema por PL único permite que algumas funcionalidades possam ser representadas de forma mais adequada, como as restrições de variação diária de nível a jusante de Itaipu e restrições de volume meta para os reservatórios ao final do horizonte de estudo. Essa funcionalidade é descrita na seção 2.2.

Decomposição do problema por “Grande Bacia”: a implementação da funcionalidade de PL único resultou, inicialmente, em um grande acréscimo no tempo computacional para resolver

¹ Neste documento, o termo “PPL” será referenciado simplesmente por “PL”, devido ao emprego difundido

o problema de simulação. Com o objetivo de reduzir esse tempo, propôs-se posteriormente a resolução do problema de forma separada por “grande bacia”, já que não existem, nesse problema de simulação, expressões que envolvam simultaneamente usinas desacopladas hidráulicamente¹. Essa funcionalidade é descrita no capítulo 4.1.

Aglutinação de bacias pequenas: com uma posterior adoção de um procedimento de se juntar, em um mesmo PL, os subproblemas de simulação referentes a diversas bacias muito pequenas, foi possível uma redução adicional, embora pequena, no tempo de resolução obtido com o aprimoramento realizado no item anterior. Este aspecto é descrito no capítulo 4.2.

Decomposição do subproblema de cada bacia através de “quebra” da bacia: finalmente, verificou-se a possibilidade de uma redução ainda maior no tempo de resolução do subproblema para bacias muito grandes, através da “quebra” artificial da bacia no ponto imediatamente a montante de um reservatório grande. Este aprimoramento é descrito no capítulo 4.3. Apesar de se tratar de um procedimento heurístico, os testes realizados na seção 6.4 mostraram que, tomados os devidos cuidados, esse procedimento não afeta os resultados de otimalidade obtidos pelo simulador.

dessa terminologia.

¹ tais como restrições de atendimento à demanda por subsistema e Função de Custo Futuro.

2. CONCEITUAÇÃO DO PROBLEMA DE SIMULAÇÃO DE BACIAS HIDRÁULICAS

Neste capítulo, descreve-se o problema de simulação hidráulica tratado neste Relatório e os aprimoramentos realizados no módulo SIMHIDR para a sua resolução.

2.1. Descrição do Problema

O problema de simulação de bacias hidráulicas tratado pelo modelo SIMHIDR [1] tem como objetivo realizar o balanço hídrico de um sistema, cascata ou bacia, a partir de metas horárias de geração previamente estabelecidas para as usinas. Além disso, deve-se satisfazer, de forma prioritária, a uma série de restrições operativas de origem hidráulica, especificadas pelo usuário.

A simulação hidráulica envolve então o cálculo, para cada usina, dos turbinamentos e vertimentos que resultam nas metas de gerações estabelecidas pelo usuário. Para que isso seja possível, modela-se uma função de produção hidroelétrica aproximada (FPHA) para cada usina.

Ressalta-se que podem ocorrer desvios entre as gerações estabelecidas pelo usuário e as obtidas pela simulação a partir da modelagem da FPHA e do cálculo do balanço hídrico. Essas diferenças podem ser causadas por dados de entrada inadequados para algumas usinas (ex: uma usina considerada como a fio d'água, mas que na prática possui uma capacidade de regularização diária), ou devido a algumas restrições operativas de origem hidráulica impostas ao modelo, que talvez não tenham sido consideradas na prática quando do estabelecimento das metas de geração.

No Manual do modelo SIMHIDR [1], apresenta-se a formulação matemática e uma descrição mais detalhada do problema de simulação hidráulica considerado neste documento.

2.2. Estratégia de Resolução Seqüencial por Período

A estratégia de resolução adotada inicialmente no módulo SIMHIDR consistia na resolução de um subproblema de programação linear individualmente para cada intervalo de tempo.

Resolvia-se em sequência os subproblemas do período 1 ao período T ¹, utilizando como condição inicial para o subproblema do período T os dados da operação já simulada nos períodos anteriores a T . A Figura 2.1 ilustra essa estratégia.

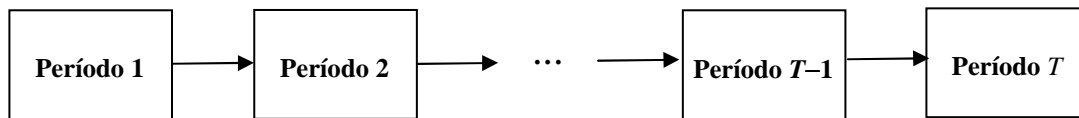


Figura 2.1 - Esquema de resolução original do problema de simulação no módulo SIMHIDR.

2.2.1 Desvantagens da estratégia sequencial

Apesar de realizar a simulação em um tempo computacional bastante reduzido, sabe-se que a estratégia de resolução do subproblema de cada período de forma individual apresenta dois grandes inconvenientes:

Perda de otimalidade: como a simulação no período T é afetada pela operação do sistema nos estágios anteriores, a decisão tomada pelo modelo nesses períodos anteriores não necessariamente (e provavelmente não) corresponde ao ótimo do problema multi-estágio. Como os custos do problema de simulação são os custos de violação do atendimento às metas de geração², poder-se-ia obter um ponto de operação que não minimizasse os desvios a essas metas;

Impossibilidade de representação de restrições que promovam acoplamento temporal: pela estratégia original, tornava-se difícil – senão impossível – a representação de restrições que promovessem grande acoplamento temporal, como por exemplo a variação máxima diária no nível a jusante de Itaipu e restrições de volume meta para os reservatórios ao final do horizonte de estudo. Tais restrições fazem com que as operações de vários intervalos de tempo tenham que ser decididas simultaneamente, a fim de se garantir o seu atendimento.

Mesmo com essas desvantagens, a principal motivação para a implementação original dessa estratégia mais simples de resolução consistia no fato de que os dados de geração para a simulação teriam sido, em princípio, determinados com base em um pré-despacho já

¹ Denota-se por T o número total de períodos (intervalos) de tempo considerados na simulação.

² A rigor, existem outros custos no problema, como penalidades para vertimento e turbinamento, mas que possuem ordem de grandeza bastante inferior se comparadas aos custos de violação das metas.

“validado” do ponto de vista hidráulico. Assim, entendia-se que o objetivo do simulador seria apenas obter a operação hidráulica do sistema.

Entretanto, quando o simulador começou a ser validado pelo Operador Nacional do Sistema, verificaram-se grandes desvios em relação às metas previstas de geração. Tornava-se necessário, então, implementar uma estratégia de resolução que garantisse um mínimo desvio em relação a essas metas.

2.3. Estratégia de resolução por PL Único

De forma a contornar os inconvenientes da estratégia seqüencial adotada originalmente, implementou-se no modelo SIMHIDR a resolução do problema de simulação por PL único. Com isso, garante-se que a solução obtida para o problema multi-estágio é ótima em relação à minimização do desvio às metas de geração fornecidas pelo usuário.

2.3.1 Desvantagem da estratégia

A estratégia de resolução por PL único pode requerer um elevado tempo computacional para a resolução do problema, principalmente quando se aumenta o número de usinas hidroelétricas e/ou o número de períodos. Por exemplo, para um caso típico elaborado pelo ONS em Junho de 2008 contendo o sistema brasileiro completo (135 usinas hidroelétricas) e com um horizonte de 4 dias com discretização de meia hora (192 períodos), o solver OSL [3] levou cerca de 30 minutos para resolver o problema.

Como a resolução do problema no menor tempo possível é uma condição crítica para um modelo que se propõe a ser empregado com uma frequência diária, torna-se necessário buscar meios de reduzir o tempo computacional para resolução do problema de simulação.

2.3.2 Propostas para redução do tempo computacional

A fim de reduzir o tempo computacional incorrido na execução da simulação hidráulica, propõem-se os seguintes aprimoramentos na estratégia de resolução do problema de simulação, em sua modalidade PL único:

Desagregação do problema por bacias: propõe-se, nesta estratégia, desagregar o sistema como um todo em diversos subsistemas menores, de acordo com a distribuição das usinas hidroelétricas em bacias. Como será discutido no capítulo 4.1, essa separação é exata do

ponto de vista matemático, ou seja, não incorre em nenhuma perda de otimalidade na resolução do problema original.

- **Aglutinação de bacias pequenas:** Após a aplicação da estratégia de desagregação do problema por bacias, descrita no capítulo 4.1, constatou-se a existência de um grande número de bacias muito pequenas, para as quais o PL da simulação hidráulica era resolvido quase que instantaneamente. Com isso, o acréscimo de tempo para se montar esses diversos subproblemas menores e obter os seus resultados poderia não compensar a redução de tempo obtida com a resolução do PL agregado. Desta forma, propôs-se aglutinar bacias com um número muito reduzido de usinas em um único PL (vide capítulo 4.2). Realizou-se também uma análise de sensibilidade em relação ao parâmetro que define o tamanho mínimo e máximo de cada PL (em relação à quantidade de usinas).
- **“Quebra” de bacias:** as duas estratégias descritas acima reduziram bastante o tempo de resolução do problema, conforme pode ser observado nos resultados mostrados na seção 6.4. Entretanto, ao se verificar a distribuição das usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN) ao longo das grandes bacias (seção 4.1.1), percebeu-se que há uma única bacia com um número elevado de usinas (bacia do Rio Grande / Paraná e seus afluentes). Para essa bacia em particular, o tempo de processamento ainda era elevado, mesmo considerando-a em separado do restante do sistema. Assim, com o intuito de reduzir ainda mais o tempo computacional, vislumbrou-se uma estratégia adicional de “quebra” dessa grande bacia em sub-bacias, em um ou mais pontos situados imediatamente a montante de grandes reservatórios. Essa estratégia é descrita no capítulo 4.3.

Nos capítulos 4.1 a 4.3 deste documento, descrevem-se os aprimoramentos descritos acima para o módulo SIMHIDR. No capítulo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresentam-se os resultados da aplicação dessas estratégias para dois estudos de caso com o sistema brasileiro.

3. DADOS PARA RESOLUÇÃO DA SIMULAÇÃO POR BACIA HIDRÁULICA

Os dados específicos para a decomposição do problema de simulação hidroelétrica por bacia são fornecidos através dos registros SH (“Simulação hidráulica”) no arquivo ENT-DADOS.XXX.

Não é necessário informar nenhum dado operativo para as usinas hidroelétricas, pois estes já são fornecidos no arquivo SIMUL.DAT. Deve-se informar, portanto, apenas os parâmetros utilizados pelo modelo referentes às diferentes opções e critérios adotados para a divisão do sistema hidroelétrico em bacias. Estes dados são indicados na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 - Dados de entrada para a resolução do problema de simulação por bacia.

Dado	Notação	Localização
Flag para realizar a simulação hidroelétrica por bacia	-	Registro SH
Flag para juntar, em um mesmo PL, bacias muito pequenas	-	Registro SH
Número mínimo e máximo de usinas hidroelétricas por bacia	-	Registro SH
Flag para utilizar o recurso de “quebra” de bacias	-	Registro SH
Relação das usinas à montante das quais deve ser feita a quebra de bacias.	-	Registro SH

Para mais detalhes sobre a disposição desses dados nos registros SH, consulte o Manual do Usuário do modelo [2]

3.1. Validação e processamento dos Dados

Além das validações usuais dos valores informados em cada campo do registro SH, há apenas duas validações em relação à consistência dos dados

- A utilização dos recursos de juntar bacias e quebrar bacias está condicionada à escolha da opção de decomposição do problema de simulação hidroelétrica;
- Todas as usinas selecionadas para serem usinas de quebra devem ser reservatórios de regularização, conforme explicação feita posteriormente na seção 4.3.2

4. ESTRATÉGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE SIMULAÇÃO POR BACIA

Nesta seção descreve-se a metodologia de decomposição do problema de simulação hidroelétrica por bacia. Esta funcionalidade permite uma série de opções diferentes para divisão das usinas hidroelétricas em bacias, de acordo com os parâmetros adotados pelo usuário, que estão descritos na seção 3. Estas diferentes opções são analisadas das seções 4.1 a 4.3.

4.1. Desagregação do problema por bacias

Como o problema de simulação hidráulica (vide capítulo 2) promove apenas acoplamento hidráulico (ou seja, não há restrição de atendimento à demanda ou qualquer outro acoplamento de origem elétrica ou energética), a resolução do problema pode ser separável por “grande bacia”. Ou seja, as operações de duas usinas que estejam totalmente desacopladas do ponto de vista hidráulico (por exemplo, usinas *A* e *B* da Figura 4.1) são independentes. Entretanto, duas usinas que não estejam no mesmo rio podem ter interdependência na sua operação, caso as águas defluídas por ambas venham a atingir uma mesma usina em outro trecho de rio mais a jusante (por exemplo, usinas *C* e *D* da Figura 4.1).

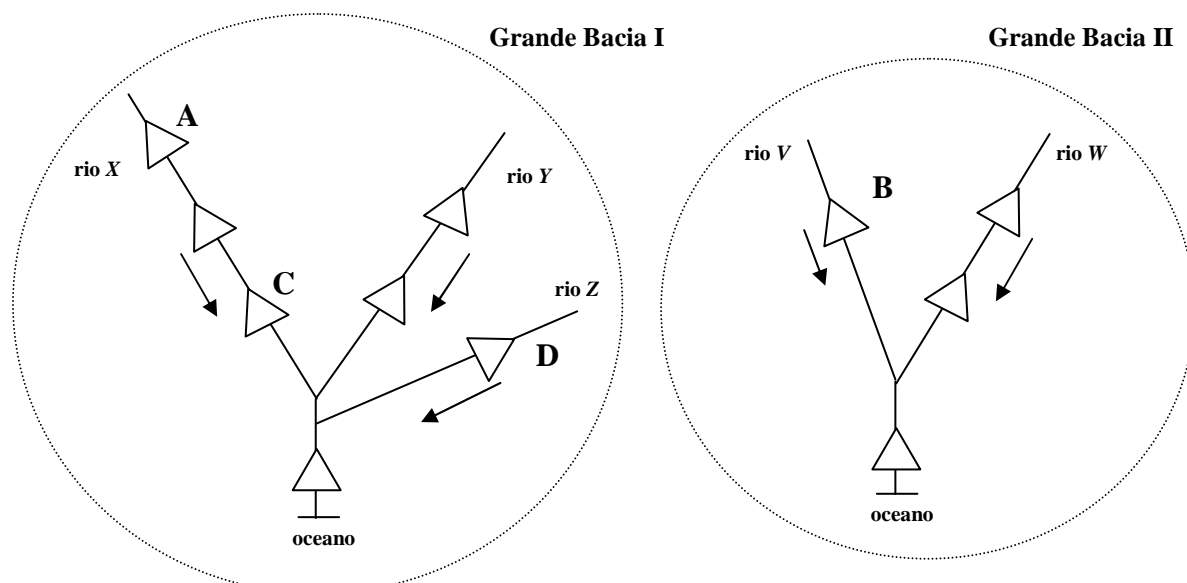


Figura 4.1 - Exemplo de divisão de um sistema em “grande bacias”, para o problema de simulação hidroelétrica.

Desta forma, pode-se decompor o problema de programação linear (PL) multi-estágio em um PL para cada grande bacia separadamente¹. Ou seja, ao invés de se resolver um único PL contendo todas as usinas, resolve-se um PL para cada grande bacia. É esperado que essa decomposição leve a uma redução no tempo total de resolução da simulação para todas as grandes bacias, já que em geral, em programação linear, é mais rápido resolver diversos subproblemas menores do que resolver um único problema maior, que envolva todas as variáveis e restrições dos subproblemas anteriores [4] .

Ressalta-se que o subproblema de cada bacia continua sendo resolvido por “PL único”, ou seja, como um grande PL incluindo todos os intervalos de tempo da simulação.

4.1.1 Distribuição das usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN) ao longo das grandes bacias

Analisando-se a configuração do Sistema Interligado Nacional (SIN) de Junho de 2009, pode-se dividir o sistema em 23 grandes bacias, que são relacionadas a seguir, em ordem decrescente de número de usinas.

Bacia 1 (52 usinas)

Camargos	Itutinga	Funil-Grande	Emborcação
Capim Branco 1	Capim Branco 2	Nova Ponte	São Simão
Jaguará	Volta Grande	Miranda	Igarapava
Caconde	A. Vermelha	Barra Bonita	Promissão
Navanhandava	E. da Cunha	A.S. Oliveira	A.S. Lima
Ibitinga	Taquaraçu	Rosana	Canoas I
Canoas II	A.A. Laydner	Chavantes	Capivara
L.N. Garcez	Jupiaá	Três Irmãos	P. Primavera
Furnas	M. de Moraes	Estreito	P. Colômbia
Marimbondó	Itumbiara	Corumbá I	Edgard Souza
Guarapiranga	Billings	Cach. Dourada	Itaipú
Pirajú	Ourinhos	Corumbá III	Corumbá IV
Traição	Pedreira	Henry Borden	Ilha Solteira

Bacia 2 (16 usinas)

Jaguari	Paraibuna	Funil	Sta. Branca
Lajes	Ilha Pombos	Sta. Cecília	Tocos
Santana	Sobragi	Picada	Nilo Peçanha
P. Passos	Vigário	Fontes A	Fontes BC

¹ O termo “grande bacia” é utilizado neste texto para não confundir com o termo “bacia”, utilizado em geral para as usinas de cada rio individualmente.

Bacia 3 (8 usinas)

G.B. Munhoz	Segredo	Salto Caxias	Jordão
Sta. Clara PR	Fundão	Salto Santiago	Salto Osório

Bacia 4 (8 usinas)

Três Marias	Queimado	Sobradinho	Itaparica
Moxotó	P. Afonso 123	Xingo	P. Afonso 4

Bacia 5 (7 usinas)

Salto Grande	Aimores	Candonga	Mascarenhas
Guilman-Amor	P. Estrela	SA. Carvalho	

Bacia 6 (6 usinas)

Serra Mesa	Peixe Angic	Cana Brava	Tucuruí
Lajeado	São Salvador		

Bacia 7 (5 usinas)

Ernestina	Passo Real	Jacuí	Itauba
D. Francisca			

Bacia 8 (4 usinas)

Machadinho	Ita	Barra Grande	Campos Novos
------------	-----	--------------	--------------

Bacia 9 (3 usinas)

Castro Alves	Monte Claro	14 de Julho	
--------------	-------------	-------------	--

Bacia 10 (2 usinas)

Itiquira I	Itiquira II		
------------	-------------	--	--

Bacia 11 (2 usinas)

Irapê	Itapebi		
-------	---------	--	--

Bacias 12 a 23 (todas com apenas 1 usina)

- 12 - Manso
- 13 - G.P. Souza
- 14 - Passo Fundo
- 15 - B. Esperança
- 16 - P. Cavalo
- 17 - Curua-Una
- 18 - Rosal
- 19 - Sta. Clara MG
- 20 - Jauru
- 21 - Guaporé
- 22 - Quebra Queixo
- 23 - Ponte Pedra

Desta forma, a aplicação, para o caso brasileiro, da estratégia de decomposição do problema de simulação por grande bacia leva à resolução de 23 PLs independentes. Note que mais de 40% das usinas (52 de um total de 125) pertencem a apenas uma dessas grandes bacias, a que envolve os rios Grande e Paraná e os seus afluentes.

4.1.2 Estratégia de decomposição do problema por bacia

Ao desagregar o sistema em bacias, passa-se a resolver diversos subproblemas menores, ao invés de um único problema grande. A implementação dessa estratégia de resolução do problema de simulação no módulo SIMHIDR requereu os seguintes procedimentos:

Identificação das bacias: implementou-se um algoritmo que identifica conjuntos de usinas que se encontram isolados, do ponto de vista hidráulico, uns dos outros. Com isso, obtém-se uma partição do sistema em várias grandes bacias desacopladas hidraulicamente;

Execução da simulação de cada bacia: para cada grande bacia, resolve-se o problema de simulação multi-estágio por “PL único”, ou seja, considerando as variáveis e restrições de todos os períodos simultaneamente;

Consolidação dos resultados de simulação do sistema: após simular todas as bacias, geram-se relatórios de operação consolidados com todas as usinas do sistema.

Os resultados numéricos da aplicação dessa estratégia são apresentados no capítulo **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

4.2. Aglutinação de bacias pequenas

Após a aplicação da estratégia de desagregação do problema por bacias, descrita no capítulo anterior, constatou-se uma distribuição bastante não uniforme da quantidade de usinas ao longo das grandes bacias, conforme mostra os dados na Tabela 4.1, que consolidam os dados apresentados na seção 4.1.1.

Pode-se perceber que há um grande número de bacias muito pequenas e, em particular, 12 bacias com apenas 1 usina. Para esse grande conjunto de pequenas bacias, cada PL da simulação hidráulica é resolvido quase que instantaneamente. Com isso, o acréscimo de tempo para se montar os diversos subproblemas e obter os seus resultados pode não

compensar, em princípio, a redução de tempo obtida com a resolução de diversos PLs menores.

Tabela 4.1 - Análise da quantidade de usinas presentes ao longo das bacias do SIN.

Quantidade de usinas	Número de bacias
52	1
16	1
8	2
7	1
6	1
5	1
4	1
3	1
2	2
1	12

Desta forma, implementou-se no modelo SIMHIDR uma estratégia de aglutinação, em um mesmo PL, de várias bacias com um número muito reduzido de usinas. Com isso, é possível reduzir o tempo de “preparação dos subproblemas” e de “coleta dos resultados” para todas essas bacias.

Define-se bacia “pequena” como uma bacia que contém poucas usinas. O usuário deve fornecer, como um parâmetro, um número mínimo de usinas (N_{minbac}) que uma bacia deve ter para que não seja considerada pequena. Desta forma, todas as bacias que não atingirem este número serão consideradas pequenas, para efeito de serem aglutinadas em um mesmo PL.

Torna-se necessário definir também outro parâmetro: o número máximo de usinas em um mesmo PPL (N_{maxbac}), caso contrário se poderia ter um PL muito grande, formado pela aglutinação de um grande número de bacias pequenas.

A partir dos parâmetros N_{minbac} e N_{maxbac} , o modelo realiza, para o conjunto de bacias definidas como pequenas, sua aglutinação em uma série de “pseudo-bacias”, cujo número de usinas estará sempre entre N_{minbac} e N_{maxbac} . Ao final desse procedimento, haverá uma nova configuração de pseudo-bacias no sistema.

A fim de esclarecer melhor esse procedimento, alguns exemplos são apresentados a seguir, tomando-se como base a lista de grandes bacias para o caso em estudo do SIN, mostrada na seção 4.1.1.

Tabela 4.2 – Exemplos da distribuição das usinas em pseudo-bacias, variando-se os parâmetros N_{minbac} e N_{maxbac} do algoritmo de aglutinação de bacias.

$N_{minbac} = 2$ $N_{maxbac} = 4$		$N_{minbac} = 2$ $N_{maxbac} = 8$		$N_{minbac} = 6$ $N_{maxbac} = 10$	
Quantidade de usinas	# pseudo-bacias	Quantidade de usinas	# pseudo-bacias	Quantidade de usinas	# pseudo-bacias
52	1	52	1	52	1
16	1	16	1	16	1
8	2	8	4	10	1
7	1	7	1	9	1
6	1	6	1	8	3
5	1	5	1	7	2
4	4	4	1		
3	1	3	1		
2	2				

Com essa estratégia de aglutinação de pequenas bacias, a simulação hidráulica é feita, portanto, resolvendo-se um PL multi-estágio para cada pseudo-bacia. Os resultados desse aprimoramento são mostrados na seção 6.3.

4.3. “Quebra” de bacias

Apesar dos bons resultados verificados com a implementação dos aprimoramentos descritos nos capítulos 4.1 e 4.2, verificou-se a possibilidade de uma redução ainda maior no tempo de resolução do problema de simulação, a partir da “quebra” artificial de bacias que tenham um elevado número de usinas.

A lista mostrada na seção 4.1.1 revela a presença de 52 usinas em uma única “grande bacia” do sistema. Essa grande bacia, que envolve as bacias dos rios Paranaíba, Grande, Tietê e Paranapanema, consumia um tempo significativo em relação ao tempo global de resolução do problema. Isso motivou a idéia de se “quebrar” essa bacia em diversas sub-bacias, para fins de resolução do problema de simulação hidráulica.

O critério adotado nos capítulos anteriores para se identificar uma bacia era procurar uma usina que tivesse defluência para o oceano, de forma que todas as usinas situadas a montante dessa ao longo das cascatas constituem uma grande bacia¹. Portanto, para que se possa quebrar essa grande bacia, deve-se procurar identificar, ao longo da mesma, alguns

¹ Para a maior bacia do sistema, que inclui os rios Grande e Paraná e seus afluentes, essa usina de acoplamento é a usina de Itaipu.

reservatórios que sejam grandes o suficiente a ponto de serem considerados como “pseudo-oceanos”. Ou seja, esse reservatório deve ser capaz de regularizar, de forma satisfatória, as vazões que chegam a ele proveniente de usinas de montante, de forma a prover as usinas de jusante das vazões necessárias para atender a suas metas de geração ao longo do período de simulação.

Considere o exemplo mostrado na Figura 4.2. Essa cascata possui 6 usinas. Se a quebra for realizada, por exemplo, na usina A, teríamos duas sub-bacias com 3 usinas cada. A primeira sub-bacia (I), de montante, desaguaria na usina de quebra (“pseudo-oceano”), e a segunda sub-bacia (II), continuaria desaguando no oceano propriamente dito. Observa-se que a usina A situa-se na sub-bacia de jusante.

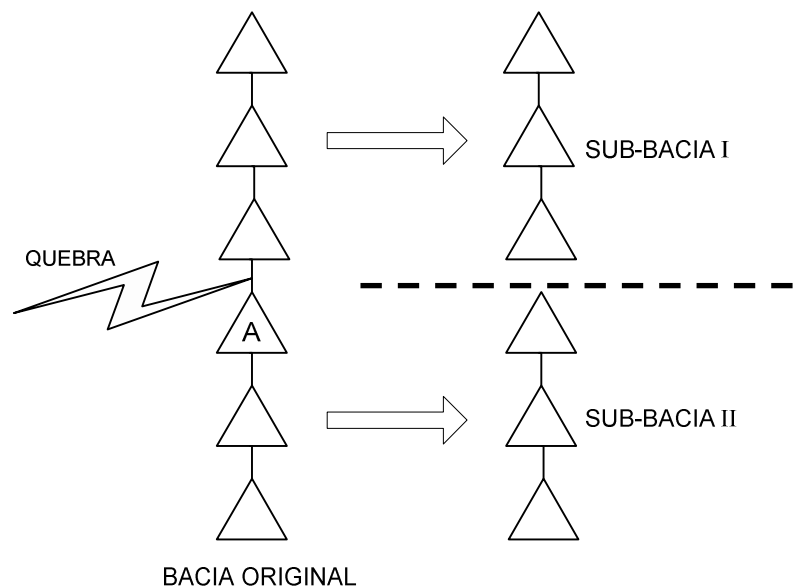


Figura 4.2 - Exemplo de “quebra” de uma grande bacia em duas bacias menores, à montante de uma usina A.

4.3.1 Ordenação da simulação das sub-bacias oriundas de uma quebra

A vazão de água que chega à usina A, situada na sub-bacia II, depende da simulação da sub-bacia I. Portanto, ao se quebrar uma bacia, deve-se ordenar a execução das simulações de forma que as sub-bacias de montante¹ sejam simuladas previamente à sub-bacia de jusante.

¹ Observa-se que pode haver mais de uma sub-bacia à montante de A, conforme ilustrado na Figura 5.2 mais adiante.

Desta forma, a afluência à usina de quebra A, proveniente da defluência das usinas situadas à montante, será conhecida ao se simular a sub-bacia II.

4.3.2 Condições para a quebra da bacia em determinada usina

É importante observar que as metas de geração impostas às usinas da sub-bacia de jusante (II) poderiam requerer um volume adicional de defluência das usinas da sub-bacia I, em relação às defluências que já foram obtidas ao se simular essa sub-bacia. Assim, poderia haver desvios nas metas de geração impostas às usinas da sub-bacia II, que não ocorreriam caso a simulação dessas duas sub-bacias fosse feita como um PL único, sem quebras.

Para diminuir a possibilidade dessa ocorrência, recomenda-se que a quebra seja feita em uma usina com reservatório grande, que possa suprir eventuais necessidades de afluência às usinas da sub-bacia II, que devido à simulação em separado não poderiam ser atendidas por defluências adicionais das usinas da sub-bacia I. As condições para que isso seja possível são discutidas na seção 4.3.2.2.

4.3.2.1. Topologia da Cascata

A posição da usina de quebra na topologia da grande bacia é um aspecto importante a ser analisado quando da identificação de uma “usina de quebra” para uma grande bacia. Duas características que favorecem que uma usina seja escolhida como usina de quebra são:

a localização da usina em um ponto mais central na cascata. Com isso, obtém-se uma maior uniformidade na quantidade de usinas nas sub-bacias resultantes da quebra e, como consequência, há uma redução do número máximo de usinas nessas sub-bacias;

a presença de vários afluentes desaguando diretamente na usina. Com isso, pode-se quebrar a grande bacia em mais de duas bacias simultaneamente,

A Figura 4.3 ilustra uma usina (A) onde a quebra da bacia seria bastante vantajosa, por unir essas duas características.

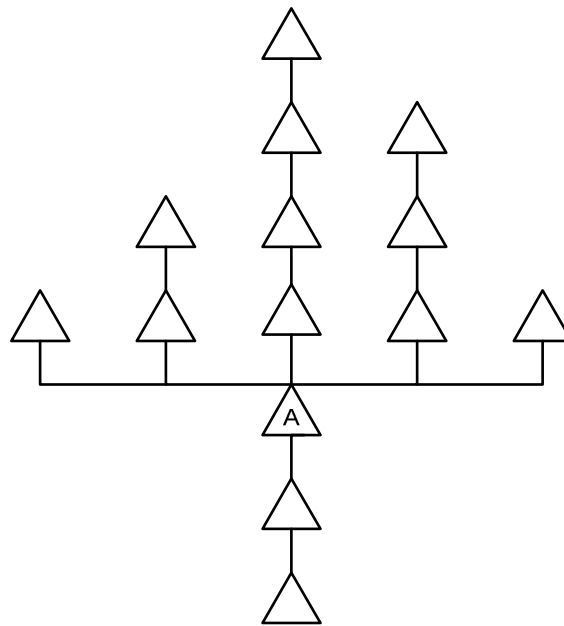


Figura 4.3 - Exemplo de uma usina (A) onde a quebra da grande bacia torna-se atraente.

4.3.2.2. Condições operativas do reservatório de quebra

Do ponto de vista hidráulico, as bacias de montante e jusante no lado direito da Figura 4.2 estão interligadas. Portanto, em princípio, a minimização dos desvios em relação às metas de geração das usinas não é garantida ao se resolver o problema de simulação separadamente em cada sub-bacia. Desta forma, a operação de quebra de uma bacia introduz um procedimento heurístico no processo de simulação hidroelétrica realizada pelo módulo SIMHIDR.

Para que a qualidade da solução da simulação hidráulica não seja comprometida, a usina de quebra deve ser suficientemente grande, de forma que sua operação não seja afetada de forma significativa pela simulação das usinas situadas à montante¹. Além disso, é necessário que o armazenamento da usina de quebra não atinja seus limites físicos ou operativos.

Para garantir que se obtenha um desvio mínimo entre as gerações obtidas pelo SIMHIDR e as metas definidas pelo usuário, é necessária a verificação, *a posteriori*, dos resultados do simulador, conforme descrito posteriormente na seção 4.3.4.

¹ Por exemplo, a produtividade (relação geração/vazão turbinada) de uma usina muito grande praticamente não irá se alterar com a variação de alguns dias no seu armazenamento. Assim, os resultados da simulação da bacia a montante da usina de quebra (que impactam o seu volume armazenado) não irão afetar significativamente a decisão ótima da simulação da bacia de jusante, onde se situa essa usina de quebra.

4.3.3 Usinas de quebra para o SIN

Com base nas recomendações gerais indicadas na seção anterior e na topologia do SIN, indicada na Figura 4.4, identificaram-se as usinas da grande bacia do Rio Grande/Paraná que são mais propícias para se tornarem “usinas de quebra”. Ou seja, essas usinas, descritas a seguir, irão dividir o problema de simulação dessa grande bacia em diversos subproblemas para sub-bacias menores:

Ilha Solteira Equivalente¹, por se situar em um ponto central da grande bacia, correspondente à confluência dos rios Paranaíba, Grande e Tietê;

Marimbondo, por separar as usinas dos rios Grande e Pardo;

Itumbiara, por se situar na confluência dos rios Corumbá, Paranaíba e Araguari.

A Tabela 4.3 mostra como ficam divididas as 125 usinas hidroelétricas da configuração do SIN considerada nesse estudo, em cada uma das seguintes opções:

sem adotar a estratégia de quebra de bacias;

quebrando-se a bacia do Rio Grande / Paraná em apenas uma das três usinas mencionadas acima (3 opções);

quebrando-se a bacia do Rio Grande / Paraná em duas das três usinas mencionadas acima (3 opções);

quebrando-se a bacia do Rio Grande / Paraná nas três usinas mencionadas acima.

¹ A usina de Ilha Solteira Equivalente engloba os reservatórios de Três Irmãos e Ilha Solteira.

Tabela 4.3 Exemplos da distribuição das usinas em pseudo-bacias, variando-se as usinas de quebra no algoritmo de quebra de bacias.

Quebras	# usinas	# bacias						
sem usinas de quebra	52	1						
	16	1						
	10	1						
	9	1						
	8	3						
	7	2						
Quebras	# usinas	# bacias	Quebras	# usinas	# bacias	Quebras	# usinas	# bacias
somente Ilha Solteira	26	1	Somente Itumbiara	44	1	Somente Marimbondo	39	1
	16	1		16	1		16	1
	15	1		10	1		10	3
	11	1		9	1		9	1
	10	1		8	4		8	3
	9	1		7	2		7	1
	8	3						
	7	2						
Ilha Solteira e Itumbiara	26	1	Ilha Solteira e Marimbondo	26	1	Itumbiara e Marimbondo	31	1
	16	1		16	1		16	1
	15	1		11	1		10	3
	10	2		10	3		9	1
	9	1		9	1		8	4
	8	4		8	3		7	1
	7	1		7	1			
				2	1			
Ilha Solteira, Itumbiara e Marimbondo	26	1						
	16	1						
	11	1						
	10	3						
	9	1						
	8	4						
	7	1						
	5	1						

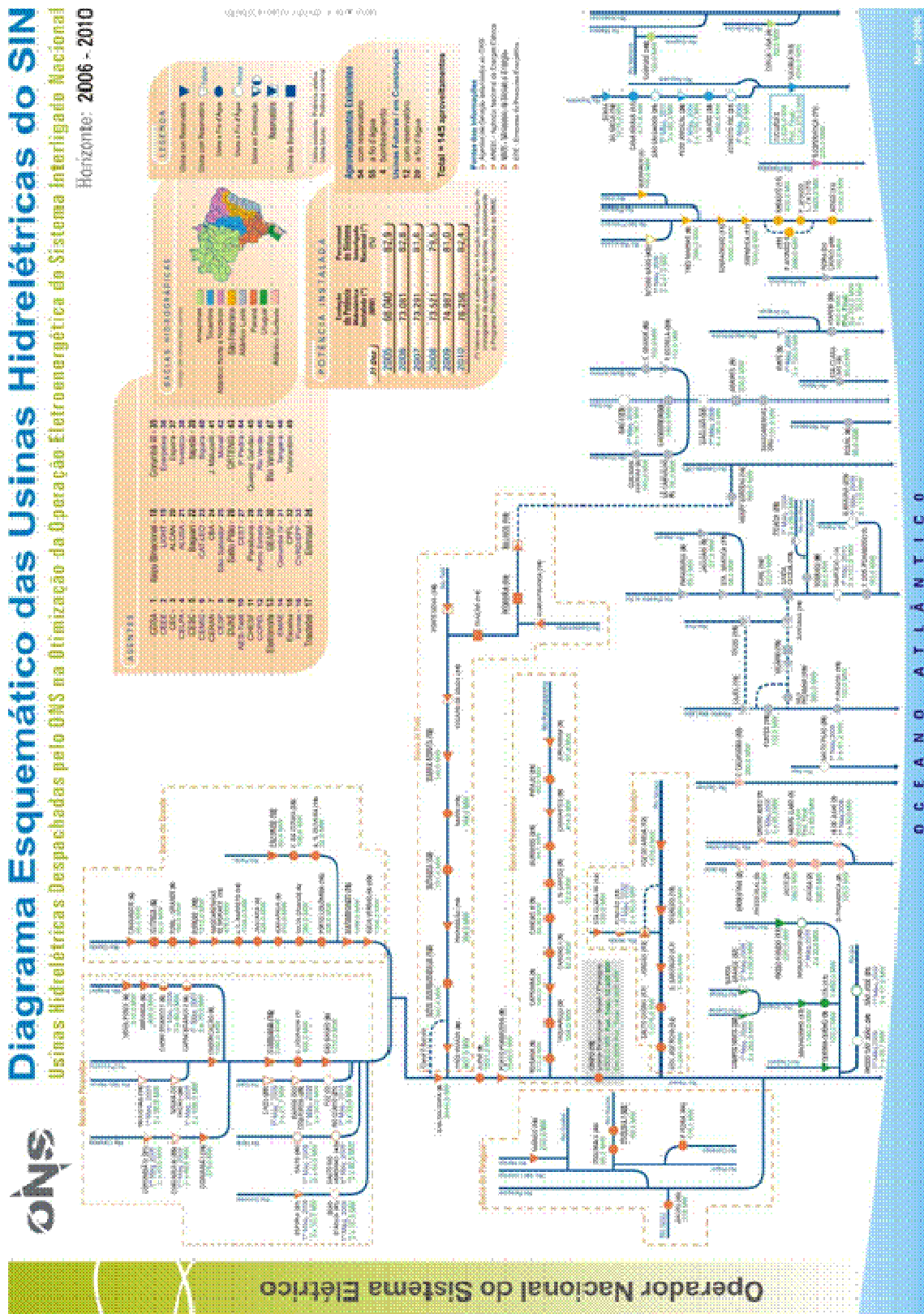


Figura 4.4 - Diagrama esquemático das usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil (Fonte: ONS - http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx#).

Observa-se que, quando a bacia do Rio Grande / Paraná é quebrada na usina de Ilha Solteira, a maior sub-bacia possui 26 usinas hidroelétricas. Por esse motivo, essa é a usina mais indicada para se realizar a divisão da bacia. A quebra somente em Itumbiara ou Marimbondo, apesar de promover uma redução no tamanho da maior sub-bacia resultante (44 e 39 usinas, respectivamente), não produz um resultado tão vantajoso como o alcançado pela quebra em Ilha Solteira. Finalmente, ganhos adicionais, embora em menor escala, ainda podem ser obtidos ao se quebrar a bacia tanto em Ilha Solteira como em Itumbiara e/ou Marimbondo.

4.3.4 Verificação da operação obtida para a usina de quebra

Uma vez realizada a quebra de determinada bacia, deve-se verificar, *a posteriori*, se houve desvio de meta significativo nas usinas que compunham a bacia original. Caso isso ocorra, é necessário verificar se a usina de quebra está em algum de seus limites operativos, seja de volume armazenado, turbinamento ou vertimento. Caso positivo, é possível que este desvio tenha sido causado pela quebra da bacia, que teria impossibilitado que a operação das usinas da bacia de jusante fosse “ajudada” por uma mudança na operação das usinas da bacia de montante. Nestes casos, o programa poderia resolver novamente o PL para a bacia como um todo, de forma a tentar encontrar uma solução que atenda às metas ou assegurar que, se houve alguma meta não atendida, isto não foi causado pelo processo de quebra da grande bacia. Esta questão será exemplificada nos testes apresentados na seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

4.3.5 Considerações adicionais

Observa-se que esta estratégia de quebra de bacias deve ser aplicada em conjunto com a estratégia de separação do PL por grande bacia, descrita no capítulo 4.1. Da mesma forma, a estratégia de aglutinação descrita no capítulo 4.2 também deve ser considerada de forma simultânea, pois pode haver uma aglutinação de sub-bacias pequenas originadas a partir da quebra de uma bacia grande.

5. RELATÓRIOS DE SAÍDA

Os relatórios referentes à funcionalidade de resolução do problema de simulação hidráulica por bacias hidroelétricas são mostrados nos arquivos relacionados a seguir:

- **SIM_BACIA:** Este arquivo mostra a divisão do sistema hidroelétrico em bacias, para fins de resolução do problema de simulação. Ressalta-se que esta divisão pode contemplar usinas de bacias diferentes em uma “grande bacia”, caso seja utilizada a opção de juntar bacias (seção 4.2) ou apresentar usinas de uma mesma cascata em bacias diferentes, caso seja utilizada a opção de quebra de bacias (seção 4.3).

Não há relatórios separados com os resultados da simulação por bacia. Portanto, os resultados de simulação para as usinas hidroelétricas são listados nos mesmos arquivos SIM_OPERACAO e SIM_HIDR gerados quando se resolve o problema de simulação por um PL-Único com todas as bacias. Isto facilita a comparação dos resultados do modelo para diferentes valores de parâmetro para a resolução da simulação por bacia (vide seção 3), já que os arquivos estão dispostos exatamente no mesmo formato.

6. ESTUDO DE CASO

Nesta seção faz-se um estudo comparativo do desempenho das diferentes estratégias de resolução do problema de simulação hidráulica discutidas nas seções anteriores:

- Resolução por “PL Único” incluindo todas as usinas do sistema (seção 2.3);
- Desagregação do problema em grandes bacias, ou seja, um PL multi-período para cada grande bacia (capítulo 4.1);
- Desagregação do problema em grandes bacias com posterior agregação de bacias muito pequenas (capítulo 4.2);
- Desagregação do problema em grandes bacias, com agregação de bacias muito pequenas, e posterior quebra da grande bacia do Rio Grande, Paraná e afluentes (capítulo 4.3).

Neste estudo, não se considerou a estratégia de resolução do problema de forma sequencial por período (seção 2.2), pois essa estratégia já havia sido abandonada devido a sua sub-otimalidade na resolução do problema

6.1. Estudo de caso

Neste estudo, consideraram-se dois casos, cujos dados foram baseados nos dados do Programa Mensal de Operação (PMO) de Abril de 2009:

- caso com 2 dias de simulação e discretização semi-horária, perfazendo um total de 96 períodos;
- caso com 4 dias de simulação e discretização semi-horária, perfazendo um total de 192 períodos;

Os testes foram realizados em um computador Pentium(R) D com CPU de 3 GHz e 1 GB de RAM.

6.2. Desempenho da decomposição do problema por bacia

A Tabela 6.1 mostra os resultados comparativos da execução do módulo SIMHIDR como um PL único para todo o sistema (seção 2.3) ou como um PL único para cada grande bacia (capítulo 4.1).

Tabela 6.1 - Tempo e custo das estratégias de resolução do problema de simulação por PL único e por desagregação em grandes bacias

Estratégia	Caso 96 períodos		Caso 192 períodos	
	Tempo	Custo (10 ³ R\$)	Tempo	Custo (10 ³ R\$)
Resolução por PL único para o sistema (1)	2:57	6.232,340	NR	-
Resolução por PL único para cada grande bacia (2)	1:17	6.232,340	4:08	7854,455
Redução no tempo (= (1)/(2))	2,30 vezes		-	

Como era de se esperar, os custos obtidos com as duas estratégias para o caso com 96 períodos foram idênticos, já que os problemas de simulação resolvidos por ambas são idênticos. Observa-se, entretanto, uma redução de tempo considerável (2,30 vezes menor) quando se utiliza a técnica de decomposição por bacia. O caso com 192 períodos não conseguiu ser executado na opção PL-Único, enquanto na opção com decomposição por bacias foi executado em pouco mais de 4 minutos.

6.3. Desempenho da agregação de pequenas bacias

Nesta seção avalia-se o desempenho da estratégia de, após desagregar o problema por bacia, agregar bacias muito pequenas em um único PL, mesmo que suas operações sejam independentes.

Como descrito no capítulo 4.2, essa estratégia envolve a definição de dois parâmetros: N_{minbac} e N_{maxbac} . Os tempos de CPU para resolução do problema de simulação para diversas combinações desses parâmetros são mostrados a seguir, para os casos de 96 períodos (Tabela 6.2) e 192 períodos (Tabela 6.3).

Tabela 6.2 - Tempos de simulação para a estratégia de aglutinação de bacias para o caso com 96 períodos.

$N_{minbac} \backslash N_{maxbac}$	4	8	10
1	1:05	1:03	1:03
2	1:02	1:00	1:00
3	1:02	1:01	0:59
6	-	0:58	0:58
Tempo de simulação sem aglutinação: 1:17			

Tabela 6.3 Tempos de simulação para a estratégia de aglutinação de bacias para o caso com 192 períodos.

$N_{minbac} \backslash N_{maxbac}$	4	8	10
1	3:48	3:42	3:42
2	3:39	3:37	3:37
3	3:41	3:36	3:36
6	-	3:37	3:34
Tempo de simulação sem aglutinação: 4:08			

Percebe-se que há uma redução adicional de tempo na aglutinação de bacias pequenas, embora esta não seja tão significativa quanto à obtida na seção 6.2. A maior redução para o caso de 96 períodos foi de cerca de 24%, e para o de 192 períodos foi de cerca de 8%. Curiosamente, a redução maior se deu no caso de menor porte.

Ressalta-se também que a variação nos parâmetros N_{minbac} e N_{maxbac} pouco altera o tempo computacional para resolução do problema, observando-se apenas uma leve redução quando se utilizou um valor maior do que 1 para N_{minbac} no caso de 192 períodos.

6.4. Desempenho da quebra de bacias

Nesta seção, apresentam-se os resultados da estratégia de “quebra” de bacias, descrita no capítulo 4.3. Ressalta-se que esse artifício deve ser empregado de forma cuidadosa, pois caso a usina de quebra (em geral, um reservatório grande) esteja próximo de um de seus limites (físicos ou operativos) de armazenamento, pode-se obter uma solução sub-ótima para o problema de simulação. Desta forma, estudou-se o desempenho dessa estratégia não só em termos de tempo de CPU, mas também em relação ao custo total de simulação.

Como mencionado anteriormente, a quebra de bacias deve ser realizada para a grande bacia do Rio Grande / Paraná, que envolve mais de 40% das usinas hidroelétricas do SIN (vide

seção 4.1.1). Os resultados obtidos para diversas alternativas de quebra das usinas são mostradas a seguir, para os casos de 96 períodos (Tabela 6.4) e 192 períodos (Tabela 6.5). A fim de isolar o efeito da quebra em relação aos demais parâmetros, tomou-se como caso de referência aquele onde não houve aglutinação de bacias pequenas.

Tabela 6.4 – Resultados da simulação para o caso de 96 períodos, para diversas alternativas de quebra da bacia do Rio Grande / Paraná

Quebras	Custo	Tempo de CPU	Redução de tempo (%)
Ilha Solteira	6.232,340	1:03	18,18
Itumbiara	6.232,340	1:14	2,60
Marimbondo	6.232,340	1:10	9,09
Ilha Solteira e Itumbiara	6.232,340	1:08	11,69
Ilha Solteira e Marimbondo	6.232,340	1:05	15,58
Itumbiara e Marimbondo	6.232,340	1:08	11,69
Ilha Solteira, Itumbiara e Marimbondo	6.232,340	1:10	9,09
Sem quebras de usinas	6.232,340	1:17	-

Tabela 6.5 – Resultados da simulação para o caso de 192 períodos, para diversas alternativas de quebra da bacia do Rio Grande / Paraná

Quebras	Custo	Tempo de CPU	Redução de tempo
Ilha Solteira	7854,455	2:35	37,50
Itumbiara	7854,455	3:34	13,71
Marimbondo	7854,455	3:17	20,56
Ilha Solteira e Itumbiara	7854,455	2:38	36,29
Ilha Solteira e Marimbondo	7854,455	2:35	37,50
Itumbiara e Marimbondo	7854,455	2:53	30,24
Ilha Solteira, Itumbiara e Marimbondo	7854,455	2:41	35,08
Sem quebras de usinas	7854,455	4:08	-

6.4.1 Redução do tempo

A redução de tempo com a quebra de bacias variou de cerca de 3 a 18% para o caso com 96 períodos, e de cerca de 13 a 37% para o caso com 192 períodos. Observa-se que as maiores reduções de tempo foram obtidas para o caso de maior porte (192 períodos).

Pode-se perceber que a usina chave do sistema para se realizar a quebra é Ilha Solteira Equivalente¹, pois foi a que forneceu os melhores resultados quando quebrada

¹ Caso as usinas de Ilha Solteira e Três irmãos sejam representadas individualmente, a quebra seria feita na usina de Ilha Solteira. Neste caso, o ganho com a quebra deverá ser menor, já que a bacia do Rio Tietê não seria

individualmente ou em conjunto com outra usina. Isto ocorre pelo fato da usina se situar em um ponto central da bacia Rio Grande Paraná, na confluência de três rios: Paranaíba, Rio Grande e Bacia do Tietê (vide Figura 4.4). Portanto, a quebra da bacia nessa usina promove a divisão do PL original da bacia Rio Grande / Paraná em quatro PLs separados: um para a sub-bacia de cada rio mencionado acima e um para as usinas cujas defluências não chegam à Ilha Solteira.

6.4.2 Otimalidade da solução

Pelos resultados mostrados na Tabela 6.4 e Tabela 6.5, percebe-se que a quebra de bacias não afetou a otimalidade da solução, pois o custo de simulação foi idêntico ao obtido quando a simulação foi resolvida com um PL único para a bacia como um todo. Ao observar os gráficos da Figura 6.1 à Figura 6.3 a seguir, verifica-se que as usinas de quebra não atingiram os seus limites operativos.

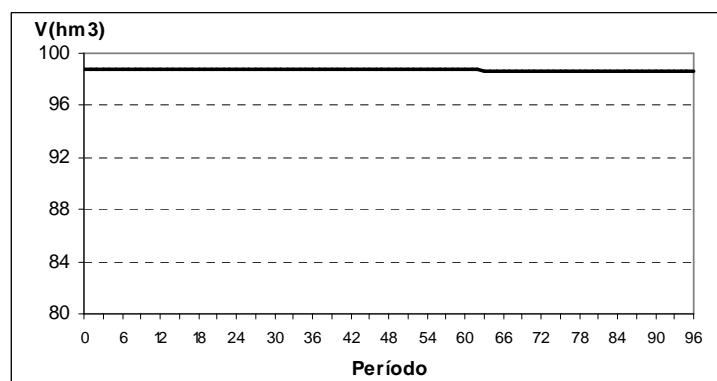
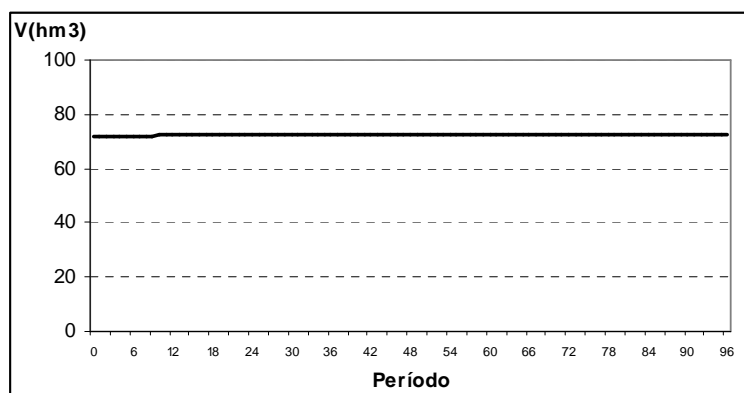


Figura 6.1 – Operação de Ilha Solteira nas alternativas que envolviam a quebra da usina .



simulada individualmente, pois Três irmãos estaria em cascata com a usina de Jupirá (vide Figura 4.4).

Figura 6.2 – Operação de Itumbiara nas alternativas que envolviam a quebra da usina.

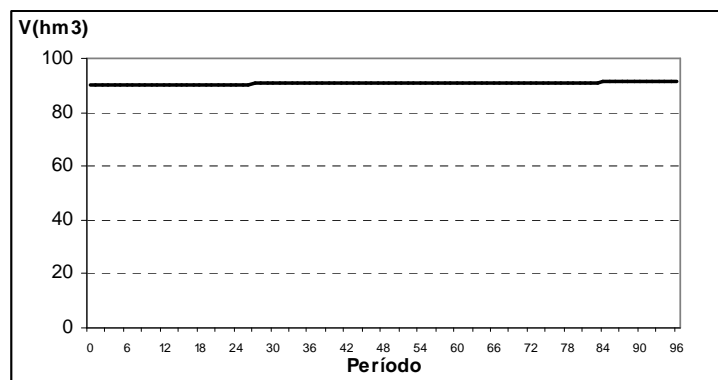


Figura 6.3 – Operação de Marimbondo nas alternativas que envolviam a quebra da usina.

6.5. Relatórios de Saída

Conforme mencionado na seção 5, os relatórios com os resultados da simulação nos arquivos SIM_HIDR e SIM_OPERACAO possuem o mesmo formato independentemente se o problema de simulação é resolvido com ou sem decomposição por bacias. Desta forma, o único relatório específico gerado quando se utiliza a estratégia de decomposição por bacia é o arquivo SIM_BACIA,XXX. cujo exemplo, para o caso com 96 períodos sem quebra ou aglutinação de bacias, é mostrado na 0 a seguir. Além da própria informação sobre o índice da bacia a que pertence cada usina, reproduzem-se alguns dados operativos das usinas.

 USIH: Número de cadastro da usina hidroelétrica
 Ibac: Índice da bacia onde foi alocada a usina
 Ijus: Número de cadastro da usina de jusante
 Vmin: Volume armazenado mínimo de cadastro (Total)
 Vmax: Volume armazenado mínimo de cadastro (Total)
 Vinic: Volume armazenado no início da simulação
 Qmax: Turbinamento máximo

USIH	Ibac	Nome	Ijus	Vmin (hm3)	Vmax (hm3)	Vinic (%VUtil)	Qmax (m3/s)
278	1	MANSO	0	4386.00	7337.00	99.24	440.00
120	2	JAGUARI	123	443.00	1236.00	99.67	72.60
121	2	PARAIBUNA	122	2096.00	4732.00	85.24	138.60
123	2	FUNIL	125	283.00	888.00	87.24	415.80
122	2	SANTA BRANCA	123	131.00	439.00	80.34	158.40
124	2	LAJES	183	0.01	445.35	78.86	0.00
130	2	ILHA POMBOS	0	8.00	8.00	-	774.40
125	2	STA CECILIA	130	6.00	6.00	-	0.00
180	2	TOCOS	181	2.00	2.00	-	0.00
181	2	SANTANA	130	12.00	12.00	-	0.00
127	2	SOBRAGI	130	1.00	1.00	-	99.00
126	2	PICADA	127	6.00	7.00	100.00	48.40
131	2	NILO PECANHA	133	38.00	38.00	-	158.40
133	2	P. PASSOS	0	17.00	17.00	-	352.00
182	2	VIGARIO	131	38.00	38.00	-	0.00
183	2	FONTES A	133	467.00	467.00	-	18.70
184	2	FONTES BC	133	38.00	38.00	-	37.40
134	3	SALTO GRANDE	135	78.00	78.00	-	145.20
143	3	AIMORES	144	156.55	185.52	100.00	1461.90
139	3	CANDONGA	143	54.44	54.44	-	349.80
144	3	MASCARENHAS	0	18.84	18.84	-	1144.00
192	3	GUILMAN-AMOR	193	12.00	12.00	-	149.60
135	3	P. ESTRELA	143	56.00	89.00	100.00	272.80
193	3	SA CARVALHO	143	1.00	1.00	-	91.30
1	4	CAMARGOS	2	120.00	792.00	97.75	242.00
2	4	ITUTINGA	4	11.00	11.00	-	259.60
4	4	FUNIL-GRANDE	6	304.00	304.00	-	643.50
24	4	EMBORCACAO	31	4669.00	17725.00	77.83	1152.80
27	4	CAPIM BRANC1	28	228.27	241.13	5.40	544.50
28	4	CAPIM BRANC2	31	878.00	879.00	100.00	594.00
25	4	NOVA PONTE	26	2412.00	12792.00	98.71	656.70

USIH	Ibac	Nome	Ijus	Vmin (hm3)	Vmax (hm3)	Vinic (%VUtil)	Qmax (m3/s)
33	4	SAO SIMAO	34	7000.00	12540.00	98.61	2937.00
9	4	JAGUARA	10	450.00	450.00	-	1183.60
11	4	VOLTA GRANDE	12	2244.00	2244.00	-	1742.40
26	4	MIRANDA	27	974.00	1120.00	65.61	742.50
10	4	IGARAPAVA	11	480.00	480.00	-	1628.00
14	4	CACONDE	15	51.00	555.00	94.97	103.40
18	4	A. VERMELHA	34	5856.00	11025.00	100.00	3253.80
37	4	BARRA BONITA	38	569.00	3135.00	92.17	831.60
40	4	PROMISSAO	42	5280.00	7408.00	97.84	1422.30
42	4	NAVANHANDAVA	43	2720.00	2720.00	-	1574.10
15	4	E. DA CUNHA	16	14.00	14.00	-	162.80
16	4	A.S.OLIVEIRA	17	25.00	25.00	-	195.80
38	4	A.S. LIMA	39	544.00	544.00	-	848.10
39	4	IBITINGA	40	985.00	985.00	-	775.50
62	4	TAQUARUCU	63	677.00	677.00	-	3157.00
63	4	ROSANA	66	1918.00	1918.00	-	3110.80
52	4	CANOAS I	61	212.00	212.00	-	623.70
51	4	CANOAS II	52	151.00	151.00	-	600.60
47	4	A.A. LAYDNER	48	3843.00	7008.00	77.89	391.60
49	4	CHAVANTES	249	5754.00	8795.00	68.19	712.80
61	4	CAPIVARA	62	4816.00	10540.00	91.71	1918.40
50	4	L.N. GARCEZ	51	45.00	45.00	-	620.40
45	4	JUPIA	46	3354.00	3354.00	-	9178.40
43	4	TRES IRMAOS	45	9923.00	13372.00	93.29	2425.50
46	4	P. PRIMAVERA	66	14400.00	14400.00	-	9794.40
6	4	FURNAS	7	5733.00	22950.00	99.55	1861.20
7	4	M. DE MORAES	8	1540.00	4040.00	90.60	1460.80
8	4	ESTREITO	9	1423.00	1423.00	-	2230.80
12	4	P. COLOMBIA	17	1524.00	1524.00	-	2186.80
17	4	MARIMBONDO	18	890.00	6150.00	91.21	3238.40
31	4	ITUMBIARA	32	4573.00	17027.00	72.76	3544.20
30	4	CORUMBA I	31	470.00	1500.00	98.96	627.00
107	4	EDGARD SOUZA	37	0.10	1.00	38.00	0.00
117	4	GUARAPIRANGA	108	0.77	189.96	91.06	0.00
118	4	BILLINGS	109	0.98	1132.65	75.99	0.00
32	4	CACH.DOURADA	33	460.00	460.00	-	2827.00
66	4	ITAIPU	0	29000.00	29000.00	-	14454.00
48	4	PIRAJU	49	84.00	84.00	-	398.20
249	4	OURINHOS	50	20.82	20.82	-	534.60
203	4	CORUMBA III	30	709.00	972.00	100.00	0.00
29	4	CORUMBA IV	203	2936.60	3624.40	100.00	228.80
108	4	TRAICAO	107	0.10	1.00	0.00	0.00
109	4	PEDREIRA	108	0.10	1.00	100.00	0.00
119	4	HENRY BORDEN	0	1.00	1.00	-	166.10
34	4	I. SOLTEIRA	45	8232.00	21060.00	99.32	10338.90
110	5	ERNESTINA	111	21.00	259.00	0.01	0.00

USIH	Ibac	Nome	Ijus	Vmin (hm3)	Vmax (hm3)	Vinic (%VUtil)	Qmax (m3/s)
108	4	TRAICAO	107	0.10	1.00	0.00	0.00
109	4	PEDREIRA	108	0.10	1.00	100.00	0.00
119	4	HENRY BORDEN	0	1.00	1.00	-	166.10
34	4	I. SOLTEIRA	45	8232.00	21060.00	99.32	10338.90
110	5	ERNESTINA	111	21.00	259.00	0.01	0.00
111	5	PASSO REAL	112	289.00	3646.00	68.09	512.60
112	5	JACUI	113	29.00	29.00	-	257.40
113	5	ITAUBA	114	620.00	620.00	-	682.00
114	5	D. FRANCISCA	0	330.00	330.00	-	413.60
74	6	G.B. MUNHOZ	76	1974.00	5779.00	35.89	1513.60
76	6	SEGREDO	77	2562.00	2950.00	71.90	1394.80
82	6	SALTO CAXIAS	0	3573.00	3573.00	-	2310.00
73	6	JORDAO	77	85.00	110.00	100.00	0.00
71	6	STA CLARA PR	72	169.00	431.00	13.32	171.60
72	6	FUNDAO	73	35.00	35.00	-	162.80
77	6	SLT.SANTIAGO	78	2662.00	6775.00	34.66	1733.60
78	6	SALTO OSORIO	82	1124.00	1124.00	-	1962.40
115	7	G.P. SOUZA	0	23.00	179.00	82.68	44.00
93	8	PASSO FUNDO	0	185.00	1589.00	64.03	114.40
91	9	MACHADINHO	92	2283.00	3340.00	22.89	1442.10
92	9	ITA	0	5100.00	5100.00	-	1749.00
86	9	BARRA GRANDE	91	2711.79	4904.45	45.11	567.60
90	9	CAMPOS NOVOS	91	1320.00	1477.00	13.07	613.80
97	10	CASTRO ALVES	98	87.00	92.00	93.50	174.90
98	10	MONTE CLARO	99	10.10	11.28	31.70	409.20
99	10	14 DE JULHO	0	49.31	55.00	93.52	374.00
156	11	TRES MARIAS	169	4250.00	19528.00	100.00	1016.40
162	11	QUEIMADO	169	95.25	557.00	92.21	79.20
169	11	SOBRADINHO	172	5447.00	34116.00	88.65	4705.80
172	11	ITAPARICA	173	7234.00	10782.00	64.51	3636.60
173	11	MOXOTO	174	1226.00	1226.00	-	2420.00
174	11	P.AFONSO 123	178	26.00	26.00	-	2164.80
178	11	XINGO	0	3800.00	3800.00	-	3273.60
175	11	P.AFONSO 4	178	121.00	121.00	-	2640.00
190	12	B. ESPERANCA	0	3173.00	5085.00	79.67	651.20
189	13	P. CAVALO	0	2192.00	3072.00	37.03	198.00
251	14	SERRA MESA	252	11150.00	54400.00	49.50	1336.50
257	14	PEIXE ANGIC	261	2210.00	2740.00	100.00	2263.80
252	14	CANA BRAVA	253	2300.00	2300.00	-	1270.50
275	14	TUCURUI	0	11293.00	50275.00	100.00	15774.00
261	14	LAJEADO	275	4940.00	4940.00	-	3740.00
253	14	SAO SALVADOR	257	952.00	952.00	-	0.00
272	15	CURUA-UNA	0	130.00	530.00	100.00	204.60
217	16	ROSAL	0	11.00	11.00	-	35.20
283	17	STA CLARA MG	0	146.00	146.00	-	145.20
195	18	JAURU	0	16.17	17.15	60.79	139.70
196	19	GUAPORE	0	21.00	21.00	-	92.40
148	20	IRAPE	154	2268.00	5964.00	94.11	320.10
154	20	ITAPEBI	0	1634.00	1634.00	-	706.20
95	21	QUEBRA QUEIX	0	111.00	137.00	20.31	125.40
281	22	PONTE PEDRA	0	199.00	199.00	-	89.10
304	23	ITIQUEIRA I	305	5.00	5.00	-	88.00
305	23	ITIQUEIRA II	0	1.00	1.00	-	90.20

USIH	Ibac	Nome	Ijus	Vmin (hm3)	Vmax (hm3)	Vinic (%VUtil)	Qmax (m3/s)
111	5	PASSO REAL	112	289.00	3646.00	68.09	512.60
112	5	JACUI	113	29.00	29.00	-	257.40
113	5	ITAUBA	114	620.00	620.00	-	682.00
114	5	D. FRANCISCA	0	330.00	330.00	-	413.60
74	6	G.B. MUNHOZ	76	1974.00	5779.00	35.89	1513.60
76	6	SEGREDO	77	2562.00	2950.00	71.90	1394.80
82	6	SALTO CAXIAS	0	3573.00	3573.00	-	2310.00
73	6	JORDAO	77	85.00	110.00	100.00	0.00
71	6	STA CLARA PR	72	169.00	431.00	13.32	171.60
72	6	FUNDAO	73	35.00	35.00	-	162.80
77	6	SLT.SANTIAGO	78	2662.00	6775.00	34.66	1733.60
78	6	SALTO OSORIO	82	1124.00	1124.00	-	1962.40
115	7	G.P. SOUZA	0	23.00	179.00	82.68	44.00
93	8	PASSO FUNDO	0	185.00	1589.00	64.03	114.40
91	9	MACHADINHO	92	2283.00	3340.00	22.89	1442.10
92	9	ITA	0	5100.00	5100.00	-	1749.00
86	9	BARRA GRANDE	91	2711.79	4904.45	45.11	567.60
90	9	CAMPOS NOVOS	91	1320.00	1477.00	13.07	613.80
97	10	CASTRO ALVES	98	87.00	92.00	93.50	174.90
98	10	MONTE CLARO	99	10.10	11.28	31.70	409.20
99	10	14 DE JULHO	0	49.31	55.00	93.52	374.00
156	11	TRES MARIAS	169	4250.00	19528.00	100.00	1016.40
162	11	QUEIMADO	169	95.25	557.00	92.21	79.20
169	11	SOBRADINHO	172	5447.00	34116.00	88.65	4705.80
172	11	ITAPARICA	173	7234.00	10782.00	64.51	3636.60
173	11	MOXOTO	174	1226.00	1226.00	-	2420.00
174	11	P.AFONSO 123	178	26.00	26.00	-	2164.80
178	11	XINGO	0	3800.00	3800.00	-	3273.60
175	11	P.AFONSO 4	178	121.00	121.00	-	2640.00
190	12	B. ESPERANCA	0	3173.00	5085.00	79.67	651.20
189	13	P. CAVALO	0	2192.00	3072.00	37.03	198.00
251	14	SERRA MESA	252	11150.00	54400.00	49.50	1336.50
257	14	PEIXE ANGIC	261	2210.00	2740.00	100.00	2263.80
252	14	CANA BRAVA	253	2300.00	2300.00	-	1270.50
275	14	TUCURUI	0	11293.00	50275.00	100.00	15774.00
261	14	LAJEADO	275	4940.00	4940.00	-	3740.00
253	14	SAO SALVADOR	257	952.00	952.00	-	0.00
272	15	CURUA-UNA	0	130.00	530.00	100.00	204.60
217	16	ROSAL	0	11.00	11.00	-	35.20
283	17	STA CLARA MG	0	146.00	146.00	-	145.20
195	18	JAURU	0	16.17	17.15	60.79	139.70
196	19	GUAPORE	0	21.00	21.00	-	92.40
148	20	IRAPE	154	2268.00	5964.00	94.11	320.10
154	20	ITAPEBI	0	1634.00	1634.00	-	706.20
95	21	QUEBRA QUEIX	0	111.00	137.00	20.31	125.40
281	22	PONTE PEDRA	0	199.00	199.00	-	89.10
304	23	ITIQUIRA I	305	5.00	5.00	-	88.00
305	23	ITIQUIRA II	0	1.00	1.00	-	90.20

Figura 6.4 Exemplo do arquivo SIM_BACIA, para o caso com 96 períodos sem quebra ou aglutinação de bacias.

7. CONCLUSÕES

Esta Nota Técnica apresentou a metodologia de resolução do problema de simulação hidroelétrica multi-estágio do módulo SIMHIDR através da desagregação do problema em grandes bacias. A partir da resolução do problema multi-estágio por “PL Único”, desenvolveram-se os seguintes aprimoramentos adicionais:

decomposição do problema por “grande bacias”, isoladas uma das outras hidraulicamente, resultando na resolução de vários problemas de programação linear (PL) multi-estágio, um para cada bacia;

aglutinação de bacias pequenas em um mesmo PL

decomposição de bacias muito grandes, através de sua “quebra” à montante de alguns reservatórios com elevada capacidade de armazenamento e situados em pontos centrais da bacia e/ou regiões de confluência de mais de um rio;

Foram apresentados resultados da aplicação das estratégias acima para dois estudos de caso com o sistema brasileiro completo, com discretizações de 96 e 192 intervalos de tempo. Os resultados permitiram que se chegassem às seguintes conclusões em relação ao desempenho de cada uma dessas alternativas:

a decomposição do problema por “grande bacias” resultou em uma redução de tempo que variou de duas a quatro vezes, quando comparada à alternativa de resolução do problema de simulação por um PL único para todo o sistema. Além disso, a avaliação do custo de simulação mostrou que a otimalidade da solução foi preservada, o que já era esperado do ponto de vista teórico, já que os problemas de simulação para cada bacia são independentes;

a técnica de aglutinação de bacias pequenas em um único PL promoveu uma redução adicional no tempo de simulação. Entretanto, esse efeito não foi tão significativo quando comparado com o já promovido pela resolução de um PL separado para cada bacia, mencionado no item acima;

a técnica de “quebra de bacias” levou a uma redução adicional de tempo de 20 a 45%, quando comparada ao tempo de resolução com um PL para cada bacia. Essa redução de tempo varia de acordo com a usina escolhida para a quebra da bacia do Rio Grande / Paraná. Embora nos testes iniciais essa quebra não tenha causado perda de otimalidade, foram gerados alguns casos adicionais, onde se mostrou que esse artifício pode levar a um custo

maior de simulação e/ou a desvios de meta, os quais não ocorreriam quando cada grande bacia é simulada por inteiro. Desta forma, a adoção dessa técnica requer uma análise a *posteriori* do resultado da simulação, a fim de verificar se a usina de quebra atingiu alguns de seus limites de armazenamento ao longo do horizonte de simulação.

Verificado o ótimo desempenho da metodologia proposta de resolução do problema de simulação por grande bacia, quando comparada à resolução por um PL único para o sistema, essa metodologia será incorporada na versão atual do modelo DESSEM-PAT, assim como na versão atual do programa SIMHIDR.

A princípio, essa funcionalidade será opcional, para que o usuário possa avaliar comparativamente a metodologia atual e a proposta, para diversos estudos de caso. Além disso, as técnicas de aglutinação de bacias pequenas e de quebra de bacias deverão ser acionadas mediante *flags* na entrada de dados do modelo. Em particular, a estratégia de quebra de bacias requer um conhecimento maior, pelo usuário, das condições necessárias para a quebra.

8. REFERÊNCIAS

- [1] CEPEL, “SIMHIDR – Simulador Hidroelétrico - Simulação da operação hidroelétrica de usinas hidroelétricas em cascata”, Relatório Técnico CEPEL DP/DEA – 14079/07, Abril de 2007.
- [2] CEPEL, “Manual do Usuário do Modelo DESSEM-PAT – Versão 6.0”, Relatório Técnico CEPEL DP/DEA –Abril de 2010
- [3] IBM Optimization Subroutine Library (OSL)—Guide and Reference, Release 2.1, 5th ed., 1995.
- [4] G. B. Dantzig, “Linear programming and extensions”, Princeton University Press, 1963.