



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

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

## **GRUPO IX**

### **GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

#### **METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE PROCESSAMENTO PARALELO NO PLANEJAMENTO DE CURTO-PRAZO (MODELO DECOMP)**

**R. J. Pinto, A.L.G.P. Sabóia, R.N. Cabral, F.S. Costa, A.L.Diniz e M. E. P. Maceira**

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

## **RESUMO**

O modelo DECOMP é utilizado no planejamento de curto prazo, modelando as usinas individualmente e adotando um horizonte de até três meses. Para o primeiro mês as aflúências são consideradas de forma determinística com discretização semanal, enquanto que para os meses seguintes são considerados cenários de aflúências médias. Por causa da complexidade do modelo, o tempo de processamento é elevado, existindo um forte apelo para a diminuição deste tempo. Neste artigo será apresentada a metodologia para executar o modelo DECOMP com processamento paralelo, utilizando instruções MPI (*Message Passing Interface*), assim como resultados de casos baseados na Programação Mensal de Operação.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Planejamento da operação, operação energética de curto prazo, otimização, processamento paralelo, MPI.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

O planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) permite o melhor aproveitamento das vazões naturais, evitando o desperdício de água e minimizando os custos de combustíveis para geração termoeletrica. Este planejamento se subdivide nas etapas de médio prazo, curto prazo e programação diária, sendo feito atualmente com o auxílio da cadeia de modelos desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL [1]. No planejamento de médio prazo (modelo NEWAVE) [2], constrói-se uma política para ser usada ao início de cada mês, a qual auxilia na determinação dos montantes de energia a serem gerados pelo parque térmico e pelo subconjunto de hidroelétricas agrupadas por regiões.

No planejamento de curto prazo (modelo DECOMP) [3], foco deste trabalho, o horizonte de planejamento é de até 1 ano (atualmente dois meses). Nessa etapa, obtêm-se metas semanais de geração para cada usina térmica e hidroelétrica do sistema para o primeiro mês de estudo, bem como os armazenamentos nos reservatórios e intercâmbios de energia entre subsistemas. As vazões afluentes do mês inicial são determinísticas e discretizadas semanalmente, sendo que, a partir do segundo mês, a discretização é mensal e as aflúências são representadas por cenários estocásticos de forma a considerar a incerteza hidrológica. Utiliza-se no acoplamento com o médio prazo a política definida pelo modelo NEWAVE, representada por uma função de custo futuro (FCF). As usinas hidroelétricas são consideradas de forma individualizada. Consideram-se diversas restrições elétricas do sistema, limites de intercâmbio entre subsistemas, restrições referentes aos usos múltiplos da água e restrições ambientais. Obtêm-se ainda novas FCF para cada estágio (semanal e mensal) do estudo, agora como função do armazenamento em cada reservatório, que serão utilizadas para a etapa de Programação Diária (modelo DESSEM-PAT) [4].

Este artigo tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada no programa DECOMP para a incorporação do processamento paralelo. Esta metodologia foi aplicada na parte estocástica, representada por cenários de aflúências, onde o processo de cálculo permite a sua paralelização, com a distribuição dos problemas a serem resolvidos para os diversos processadores participantes do ambiente de processamento paralelo, sendo que a versão atual do programa DECOMP permite a execução de casos com mais de um mês estocástico. As comunicações entre os processadores, ou seja, os envios e recebimentos de dados e resultados, são feitos através de instruções MPI [5,6]. Estas instruções fazem parte de uma biblioteca de rotinas, desenvolvidas especialmente para passagem de mensagens entre processadores.

A paralelização do programa DECOMP é a continuação de um processo, iniciado pelo modelo NEWAVE [7], no qual o CEPEL objetiva a diminuição significativa do tempo computacional gasto pelos seus modelos, graças à aplicação de estratégias de programação paralela.

Este artigo é um aprimoramento de [8], uma vez que os resultados foram obtidos para um caso com dois meses estocásticos, com uma nova versão do modelo DECOMP e no novo *cluster* do CEPEL. Ele é composto de 6 seções. Na seção 2 está apresentada a metodologia proposta para a distribuição de tarefas do programa DECOMP. Na seção 3 está apresentado o novo *cluster* do CEPEL. Os resultados estão apresentados na seção 4, enquanto que as conclusões estão mostradas na seção 5. Por fim, o seção 6 mostra as referências utilizadas neste trabalho.

## 2.0 - METODOLOGIA UTILIZADA PARA EXECUÇÃO DO DECOMP EM AMBIENTES DE PROCESSAMENTO PARALELO

### - Modelo DECOMP

O modelo DECOMP, como os modelos NEWAVE e DESSEM, busca obter a operação que minimiza o custo total de operação, respeitando as diversas restrições físicas e operativas do sistema e atendendo à demanda requerida em cada intervalo de tempo (o qual pode ser subdividido em patamares de carga). A função objetivo e as restrições são representadas de maneira linear, o que caracteriza o problema de otimização como um Problema de Programação Linear (PPL).

De forma simplificada, o PPL resolvido pelo modelo DECOMP pode ser escrito da seguinte forma:

PPL: minimizar (custo presente + custo futuro)

- Sujeito a:
- Equações de balanço hídrico das usinas hidroelétricas;
  - Equações de atendimento à demanda dos subsistemas;
  - Volumes de espera nos reservatórios para controle de cheias;
  - Vazões defluentes mínimas e/ou máximas das usinas hidroelétricas;
  - Geração térmica mínima de cada usina termoeletrica;
  - Limites das variáveis (armazenamento, turbinamento, geração, intercâmbio etc.);
  - Função de produção energética de cada usina hidroelétrica.

A estratégia de resolução do PPL do modelo DECOMP consiste em sua desagregação em subproblemas para cada estágio e cenário, e na utilização da metodologia de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE)[9]. A PDDE envolve a construção de cortes de Benders, que são adicionados gradativamente ao subproblema de cada estágio/cenário, consistindo em aproximações sucessivas de suas respectivas FCF.

### - Implementação do Processamento Paralelo

Como descrito anteriormente, o processo de solução do modelo utiliza vazões afluentes conhecidas para as semanas do primeiro mês e cenários de vazões mensais afluentes às usinas do sistema a partir do segundo mês do estudo. Durante o processo de descida da árvore de cenários (Processo *Down*), as soluções dos diversos PPLs do segundo mês em diante, resultantes da utilização dos cenários de vazões, podem ser resolvidos de forma simultânea, uma vez que a solução de um não depende de nenhum dos outros problemas. Esta característica não existe nos problemas semanais do primeiro mês, uma vez que as condições iniciais do problema de uma semana depende do estado final do problema da semana anterior. Aplicando-se técnicas de processamento paralelo nos subproblemas a partir do segundo mês, espera-se um ganho significativo de tempo final de processamento. A Figura 1 ilustra estas características do processo *Down* na solução do modelo DECOMP.

O processo de subida da árvore de cenários (processo *Backward*), possui características similares ao processo de descida, com a diferença de que, com os resultados do período posterior, gera-se um corte de Benders, que é utilizado no problema imediatamente anterior, conforme pode ser visto na Figura 2.

Uma premissa básica adotada na paralelização do modelo DECOMP é que todos os resultados que o programa apresenta devem ser os mesmos para qualquer quantidade de processadores escolhida. A possibilidade de existirem resultados diferentes, para quantidades diferentes, se deve à existência de PPLs com múltiplas soluções. Portanto, dependendo da base inicial utilizada, a solução de um PPL pode diferir, levando a soluções de custos diferentes dentro da tolerância de otimalidade especificada. Para evitar este fato, a solução adotada foi a

de executar o primeiro PPL, gerar uma base viável, e enviá-la para ser a base inicial de todos os PPLs de todos os processadores e, além disto, inicializar as condições iniciais da biblioteca de solução de programação linear utilizada para resolver os PPLs. Estes procedimentos fazem com que a execução da versão com processamento paralelo em um processador seja mais lenta que a versão oficial gerada no sistema operacional Windows®. Porém, com a possibilidade de execução em ambiente multiprocessado, a versão paralela é, obviamente, mais rápida quando a execução é feita com vários processadores.

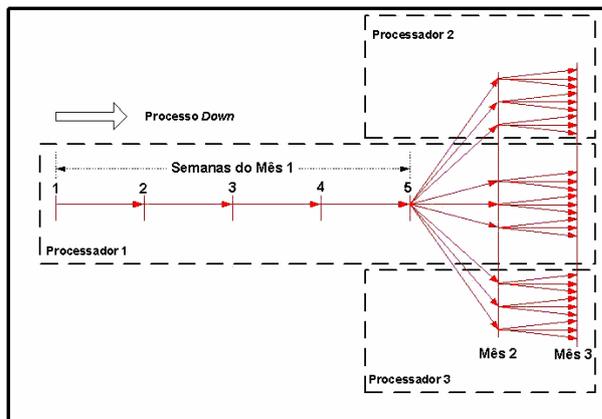


Figura 1 - Distribuição dos Problemas na Solução com Processo Paralelo Durante o Processo Down

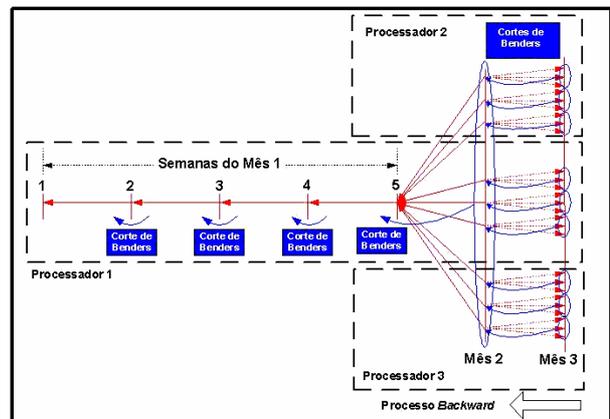


Figura 2 - Distribuição dos Problemas na Solução com Processo Paralelo Durante o Processo Backward

As comunicações entre os processadores são feitas através de instruções MPI (*Message Passing Interface*), sendo que estas instruções fazem parte de uma biblioteca de rotinas, desenvolvidas especialmente para passagem de mensagens entre processadores. Em geral, as instruções MPI podem ser do tipo ponto-a-ponto, quando um processador envia diretamente para outro, ou coletivas, quando um processador envia para todos os outros, ou recebe de todos os outros. A escolha do melhor tipo de mensagem é feita depois de um estudo do processo em questão, objetivando o máximo desempenho final do programa.

### 3.0 - AMBIENTE PARA PROCESSAMENTO PARALELO (CLUSTER)

O CEPEL adquiriu recentemente um novo cluster composto de 42 placas de processamento do tipo *blade*, cada uma com 2 processadores com quatro núcleos com *clock* de 2,66GHz e 16Gbytes de memória RAM, totalizando 336 processadores. Para armazenamento de dados este sistema possui um *storage* com 10 discos de 500Gbytes, totalizando 5Tbytes. Este cluster possui uma estrutura montada através de sistema de filas e *softwares* de gerenciamento, possibilitando a administração e uso dos recursos disponíveis de maneira eficiente e transparente, permitindo assim, a partir da quantidade desejada, a alocação dinâmica dos processadores que serão dedicados ao processamento da aplicação do usuário. O sistema operacional utilizado é o Linux e para a comunicação entre os processadores foi adotado o padrão MPI, através da utilização da implementação MPICH2, desenvolvido pelo Argonne National Laboratory Group da Universidade de Chicago, Estados Unidos. Esta implementação consiste de um conjunto de rotinas para trocas de mensagens em ambiente de memória distribuída, que segue a sintaxe e a semântica definida pelo padrão MPI, além de um gerenciador para realizar a comunicação das mensagens entre os processadores, propriamente dita. As rotinas, ou funções, da biblioteca são implementadas ao longo do código do programa para viabilizar a distribuição de tarefas entre os processadores participantes do ambiente distribuído.

### 4.0 - RESULTADOS

Este capítulo de resultados consiste em verificar os resultados e avaliar o desempenho da estratégia de paralelização adotada. Foram utilizados os casos baseados no Plano Mensal de Operação Eletroenergética (PMO) elaborados pelo ONS, revisão 0, do mês de janeiro de 2008 até o mês de janeiro de 2009, além de um caso teste baseado no PMO de abril de 2008 com três meses de horizonte, sendo um mês determinístico e dois meses estocásticos.

#### - Verificação dos Resultados dos Casos de PMO (RV0)

A primeira parte da verificação de resultados consistiu na execução de vários casos com várias quantidades de processadores e na comparação dos resultados destes casos. Como era de se esperar, os resultados obtidos não variaram com a quantidade de processadores utilizados.

A segunda parte da verificação foi a comparação dos resultados da versão 14.9.4 com processamento paralelo com os da versão 14 oficial, sendo que a versão oficial foi gerada utilizando o compilador Watcom®, em ambiente Windows®. Na **Tabela 1** estão mostradas as convergências finais das duas versões. Pode-se observar que, apesar dos casos terem convergido com quantidades de iterações diferentes, os valores finais de  $Z_{inf}$  e  $Z_{sup}$  foram

bastantes parecidos. A maior diferença encontrada foi de 0,00164% na variável  $Z_{sup}$  no meses de novembro e dezembro de 2008.

Tabela 1 - Comparação das Convergências Entre as Versões Windows e Linux

Mês	Versão	Iterações	Zinf	Zsup	Mês	Versão	Iterações	Zinf	Zsup
Janeiro 2008	Windows	16	51517928.5	51518378.7	Agosto 2008	Windows	11	52914175.0	52914595.3
	Linux	17	51517867.5	51518369.6		Linux	12	52914231.8	52914743.7
	Dif. (%)		0.00012	0.00002		Dif. (%)		0.00011	0.00028
Fevereiro 2008	Windows	34	60708896.2	60709363.4	Setembro 2008	Windows	13	56569516.1	56569899.7
	Linux	32	60708961.2	60709522.6		Linux	10	56569425.2	56569802.5
	Dif. (%)		0.00011	0.00026		Dif. (%)		0.00016	0.00017
Março 2008	Windows	22	45913759.4	45914215.8	Outubro 2008	Windows	9	41573807.6	41573966.7
	Linux	26	45913829.2	45914209.6		Linux	10	41573654.9	41573999.1
	Dif. (%)		0.00015	0.00001		Dif. (%)		0.00037	0.00008
Abril 2008	Windows	30	45095535.7	45095964.8	Novembro 2008	Windows	9	38981640.8	38981938.9
	Linux	38	45095599.1	45096046.4		Linux	9	38982255.3	38982579.3
	Dif. (%)		0.00014	0.00018		Dif. (%)		0.00158	0.00164
Maio 2008	Windows	12	40675140.1	40675467.1	Dezembro 2008	Windows	11	37431304.2	37431519.6
	Linux	17	40675208.3	40675574.2		Linux	12	37431857.0	37432133.4
	Dif. (%)		0.00017	0.00026		Dif. (%)		0.00148	0.00164
Junho 2008	Windows	8	47255689.8	47256047.2	Janeiro 2009	Windows	34	54878727.9	54879274.5
	Linux	9	47255683.7	47256092.9		Linux	29	54878773.6	54879311.9
	Dif. (%)		0.00001	0.00010		Dif. (%)		0.00008	0.00007
Julho 2008	Windows	12	49665748.8	49666044.6					
	Linux	11	49665659.5	49666156.0					
	Dif. (%)		0.00018	0.00022					

Windows → Versão 14.0

Linux → Versão 14.9.4

A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram os valores encontrados para os CMOs médios por subsistema. Nestas tabelas, os valores das semanas na parte esquerda se referem às execuções da versão 14.9.4 do modelo DECOMP no novo *cluster* do CEPEL, enquanto que os valores semanais da parte direita se referem às execuções oficiais disponibilizadas pelo ONS. Abaixo dos valores obtidos pela versão com processamento paralelo, estão calculadas as diferenças destes valores em relação ao respectivo valor oficial, que está na parte direita da tabela. Todos os valores cuja diferença em relação ao oficial foi superior a 1% foram marcados em cinza, sendo que na maior diferença o número foi grifado em negrito.

Tabela 2 - Valores Médios dos Custos Marginais da Operação (CMO) por Subsistemas (Jan08-Jun08)

Custo Marginal da Operação (Valores Médios por Subsistema) (\$/MWh)																			
PMO	Sub Sistema	Versões												Diferenças (%)					
		v14.9.4 Cluster/Linux						v14 Oficial/Windows											
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Janeiro 2008	SE	248.8	252.2	251.7	249.4	248.7	-	248.8	252.2	252.0	249.8	248.8	-	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	-
	S	248.8	252.2	251.7	249.4	248.7	-	248.8	252.2	252.0	249.8	248.8	-	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	-
	NE	250.8	252.2	252.6	249.4	251.3	-	250.8	252.2	252.7	250.3	251.2	-	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	-
	N	250.8	252.2	252.6	249.4	249.0	-	250.8	252.2	252.7	249.8	249.0	-	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	-
	FC	250.8	252.2	252.6	249.4	249.0	-	250.8	252.2	252.7	249.8	249.0	-	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	-
Fevereiro 2008	SE	554.7	551.9	550.2	547.3	545.7	-	555.0	552.0	550.3	547.3	545.6	-	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	S	554.7	551.9	550.2	547.3	545.7	-	555.0	552.0	550.3	547.3	545.6	-	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	NE	554.7	551.9	550.2	547.3	545.7	-	555.0	552.0	550.3	547.3	545.6	-	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	554.7	551.9	550.2	529.9	460.7	-	555.0	552.0	550.3	530.1	460.1	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-
	FC	554.7	551.9	550.2	529.9	460.7	-	555.0	552.0	550.3	530.1	460.1	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-
Março 2008	SE	146.2	142.4	143.3	140.9	143.8	-	146.8	142.0	143.3	140.9	143.1	-	0.4	-0.3	0.0	0.0	-0.5	-
	S	146.2	144.2	144.0	142.8	144.8	-	146.8	143.9	144.0	142.6	144.8	-	0.4	-0.2	0.0	-0.2	0.0	-
	NE	132.9	133.3	133.3	133.8	134.1	-	133.0	133.3	133.3	133.8	134.1	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	132.9	133.3	133.3	133.8	134.1	-	133.0	133.3	133.3	133.8	134.1	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	FC	132.9	133.3	133.3	133.8	134.1	-	133.0	133.3	133.3	133.8	134.1	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Abril 2008	SE	82.0	82.0	80.4	70.9	58.1	-	83.3	81.7	80.5	69.8	62.3	-	1.5	-0.3	0.1	-1.6	<b>6.8</b>	-
	S	86.2	86.0	84.8	79.9	74.7	-	86.5	85.9	84.8	79.5	76.8	-	0.4	-0.1	0.0	-0.5	2.6	-
	NE	82.0	81.8	81.6	81.7	71.1	-	82.0	81.8	81.6	81.7	71.1	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	52.3	52.3	52.0	41.4	0.0	-	52.3	52.3	52.0	40.8	0.0	-	0.0	0.0	0.0	-1.4	-	-
	FC	81.2	81.2	79.8	70.8	58.1	-	81.7	81.0	79.8	69.7	62.3	-	0.6	-0.2	0.0	-1.6	<b>6.8</b>	-
Maio 2008	SE	34.9	34.9	35.2	34.9	35.4	35.5	34.9	34.9	35.1	34.7	35.3	35.4	0.0	0.1	-0.2	-0.4	-0.3	-0.5
	S	34.9	34.9	35.2	34.9	35.4	35.5	34.9	34.9	35.1	34.7	35.3	35.4	0.0	0.1	-0.2	-0.4	-0.3	-0.5
	NE	35.4	35.5	35.7	35.4	35.8	35.8	35.4	35.5	35.7	35.4	35.6	35.6	0.0	0.1	-0.2	-0.2	-0.4	-0.4
	N	20.0	22.7	22.8	3.2	35.4	35.5	20.0	22.7	22.7	3.2	35.3	35.4	0.0	0.0	-0.2	0.9	-0.3	-0.5
	FC	34.9	34.9	35.1	34.8	35.4	35.5	34.9	34.9	35.1	34.7	35.3	35.4	0.0	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.5
Junho 2008	SE	79.8	79.9	79.9	80.0	80.3	-	80.0	79.7	79.9	79.9	80.2	-	0.2	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-
	S	79.8	79.9	79.9	80.0	80.3	-	80.0	79.7	79.9	79.9	80.2	-	0.2	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-
	NE	78.0	79.9	79.9	80.0	80.3	-	78.0	79.7	79.9	79.9	80.2	-	0.0	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-
	N	78.0	79.9	79.9	80.0	80.3	-	78.0	79.7	79.9	79.9	80.2	-	0.0	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-
	FC	78.0	79.9	79.9	80.0	80.3	-	78.0	79.7	79.9	79.9	80.2	-	0.0	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-

A análise dos valores destas tabelas mostra que, excetuando-se o mês de abril, todas as diferenças ficaram abaixo de 1%. Apesar das diferenças ocorridas no mês de abril, decorrentes do ponto de operação encontrado como solução para o despacho, que foi um pouco mais longe do encontrado pela versão oficial, isso não significa que os resultados estejam errados, uma vez que houve coerência de valores com relação a outros resultados, em especial com relação ao custo total de operação.

Tabela 3 - Valores Médios dos Custos Marginais da Operação (CMO) por Subsistemas (Jul08-Jan09)

		Custo Marginal da Operação (Valores Médios por Subsistema) (\$/MWh)																	
PMO	Sub Sistema	Versões												Diferenças (%)					
		v14.9.4 Cluster/Linux						v14 Oficial/Windows											
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Julho 2008	SE	87.2	87.2	87.6	87.6	87.3	-	87.3	87.3	87.4	87.7	87.3	-	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.0	-
	S	87.2	87.2	87.6	87.6	87.3	-	87.3	87.3	87.4	87.7	87.3	-	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.0	-
	NE	87.2	87.2	87.6	87.6	87.3	-	87.3	87.3	87.4	87.7	87.3	-	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.0	-
	N	87.2	87.2	87.6	87.6	87.3	-	87.3	87.3	87.4	87.7	87.3	-	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.0	-
	FC	87.2	87.2	87.6	87.6	87.3	-	87.3	87.3	87.4	87.7	87.3	-	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.0	-
Agosto 2008	SE	143.7	143.6	143.2	142.6	142.1	141.7	143.8	143.7	143.2	142.4	142.0	141.7	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0
	S	143.7	143.6	143.2	142.6	142.1	141.7	143.8	143.7	143.2	142.4	142.0	141.7	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0
	NE	143.7	143.6	143.2	142.6	142.1	141.7	143.8	143.7	143.2	142.4	142.0	141.7	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0
	N	143.7	143.6	143.2	142.6	142.1	141.7	143.8	143.7	143.2	142.4	142.0	141.7	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0
	FC	143.7	143.6	143.2	142.6	142.1	141.7	143.8	143.7	143.2	142.4	142.0	141.7	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0
Setembro 2008	SE	90.1	89.8	90.3	90.4	90.9	-	89.9	89.7	90.1	90.6	90.9	-	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.0	-
	S	89.8	88.0	87.9	88.2	88.6	-	89.6	87.8	87.7	88.2	88.7	-	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	0.1	-
	NE	90.1	89.8	90.3	90.4	90.9	-	89.9	89.7	90.1	90.6	90.9	-	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.0	-
	N	90.1	89.8	90.3	90.4	90.9	-	89.9	89.7	90.1	90.6	90.9	-	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.0	-
	FC	90.1	89.8	90.3	90.4	90.9	-	89.9	89.7	90.1	90.6	90.9	-	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.0	-
Outubro 2008	SE	100.6	100.4	100.4	100.2	100.3	-	100.6	100.5	100.5	100.2	100.2	-	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	-
	S	100.6	100.4	100.4	100.2	100.3	-	100.6	100.5	100.5	100.2	100.2	-	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	-
	NE	100.6	100.4	100.4	100.2	100.3	-	100.6	100.5	100.5	100.2	100.2	-	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	-
	N	100.6	100.4	100.4	100.2	100.3	-	100.6	100.5	100.5	100.2	100.2	-	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	-
	FC	100.6	100.4	100.4	100.2	100.3	-	100.6	100.5	100.5	100.2	100.2	-	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	-
Novembro 2008	SE	104.1	103.7	103.5	104.2	104.7	-	104.1	103.8	103.6	104.2	104.6	-	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-
	S	79.6	103.6	103.5	104.2	104.7	-	79.6	103.7	103.6	104.2	104.5	-	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-
	NE	104.1	103.7	103.5	104.2	104.7	-	104.1	103.8	103.6	104.2	104.6	-	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-
	N	104.1	103.7	103.5	104.2	104.7	-	104.1	103.8	103.6	104.2	104.6	-	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-
	FC	104.1	103.7	103.5	104.2	104.7	-	104.1	103.8	103.6	104.2	104.6	-	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-
Dezembro 2008	SE	95.0	94.8	94.9	93.7	93.7	-	95.1	94.9	94.9	93.8	93.7	-	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-
	S	94.8	94.7	94.9	93.7	93.7	-	94.9	94.8	94.9	93.8	93.7	-	-0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-
	NE	95.0	94.8	94.9	93.7	93.7	-	95.1	94.9	94.9	93.8	93.7	-	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-
	N	95.0	94.8	94.9	93.7	93.7	-	95.1	94.9	94.9	93.8	93.7	-	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-
	FC	95.0	94.8	94.9	93.7	93.7	-	95.1	94.9	94.9	93.8	93.7	-	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-
Janeiro 2009	SE	76.5	77.1	77.4	76.7	76.7	76.3	76.5	77.2	77.3	76.7	76.6	76.2	0.0	0.2	0.0	0.0	-0.1	-0.1
	S	76.5	77.1	77.4	76.7	76.7	76.3	76.5	77.2	77.3	76.7	76.6	76.2	0.0	0.2	0.0	0.0	-0.1	-0.1
	NE	76.5	65.0	61.7	54.1	51.6	51.5	76.5	64.7	61.6	54.1	51.4	51.5	0.0	-0.5	-0.2	0.0	-0.3	0.0
	N	76.5	65.0	61.7	54.1	51.6	51.5	76.5	64.7	61.6	54.1	51.4	51.5	0.0	-0.5	-0.2	0.0	-0.3	0.0
	FC	76.5	65.0	61.7	54.1	51.6	51.5	76.5	64.7	61.6	54.1	51.4	51.5	0.0	-0.5	-0.2	0.0	-0.3	0.0

Com relação aos resultados das energias armazenadas, a Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os valores obtidos com as duas versões em comparação, além da diferença entre eles. Assim como foi feito para os CMOs, todos os valores cuja diferença em relação ao oficial foi superior a 1% foram marcados em cinza, sendo que na maior diferença o número foi grifado em negrito.

Tabela 4 - Valores das Energias Armazenadas nos Subsistemas (Jan08-Jun08)

		Energia Armazenada nos Sub-Sistemas (%EARM Máxima)																	
PMO	Sub-Sistema	Versões												Diferenças (%)					
		v14.9.4 Cluster/Linux						v14 Oficial/Windows											
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Janeiro 2008	SE	48.5	50.4	52.3	54.4	56.8	-	48.5	50.3	52.3	54.4	56.8	-	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	-
	S	73.0	72.1	71.7	72.1	72.3	-	73.0	72.2	71.9	72.3	72.9	-	0.0	-0.1	-0.3	-0.3	-0.8	-
	NE	28.3	29.4	31.1	33.7	36.5	-	28.3	29.4	31.1	33.7	36.5	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	32.0	35.2	37.8	38.9	38.4	-	32.0	35.2	37.8	38.9	38.4	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Fevereiro 2008	SE	47.8	49.9	51.8	53.9	56.1	-	47.8	49.9	51.8	53.9	56.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	-
	S	66.4	67.6	67.3	67.9	68.9	-	66.5	67.6	67.3	68.1	69.2	-	-0.2	0.0	0.0	-0.3	-0.4	-
	NE	29.0	29.8	30.4	31.0	31.8	-	29.0	29.8	30.4	31.0	31.8	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	29.8	31.6	33.2	37.0	42.9	-	29.8	31.6	33.2	37.0	42.9	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Março 2008	SE	69.0	71.4	74.0	76.2	78.3	-	69.0	71.5	74.0	76.2	78.3	-	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-
	S	47.1	47.2	47.5	48.1	48.0	-	47.0	47.0	47.4	47.9	48.0	-	0.2	0.4	0.2	0.4	0.0	-
	NE	49.9	51.9	54.3	56.8	59.2	-	49.9	51.9	54.3	56.8	59.2	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	46.7	51.7	58.9	67.3	79.2	-	46.7	51.7	58.9	67.3	79.2	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Abril 2008	SE	79.9	81.2	82.0	82.5	82.9	-	79.9	81.2	82.0	82.5	82.9	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	S	43.5	44.2	44.9	45.9	47.6	-	43.5	44.2	44.9	45.9	47.6	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	NE	67.0	69.2	71.5	72.7	74.2	-	67.0	69.2	71.5	72.6	74.2	-	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-
	N	92.2	92.7	92.9	93.4	94.2	-	89.3	92.7	92.9	93.4	94.2	-	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Maio 2008	SE	83.6	84.0	84.3	84.4	84.5	84.1	83.6	84.0	84.3	84.4	84.5	84.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1
	S	45.9	49.4	53.8	59.9	64.2	66.6	46.0	49.5	53.9	59.6	63.8	66.0	-0.2	-0.2	-0.2	0.5	0.6	0.9
	NE	81.7	82.2	82.5	82.7	82.3	82.4	81.6	82.2	82.5	82.7	82.8	82.4	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.6	0.0
	N	95.8	96.2	96.3	96.5	96.7	96.5	95.4	95.9	95.9	96.5	96.6	96.6	0.4	0.3	0.4	0.0	0.1	-0.1
Junho 2008	SE	82.5	82.1	81.6	81.2	80.6	-	82.5	82.1	81.6	81.2	80.6	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	S	62.5	61.5	61.2	59.9	57.8	-	62.3	61.2	60.8	60.2	57.9	-	0.3	0.5	0.7	-0.5	-0.2	-
	NE	80.5	78.1	75.9	73.7	71.5	-	80.5	78.1	75.9	73.7	71.6	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-
	N	95.7	95.4	95.0	94.7	94.4	-	95.7	95.4	95.0	94.7	94.4	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-

Tabela 5 - Valores das Energias Armazenadas nos Subistemas (Jul08-Jan09)

		Energia Armazenada nos Sub-Sistemas (%EARM Máxima)																	
PMO	Sub-Sistema	Versões												Diferenças (%)					
		v14.9.4 Cluster/Linux						v14 Oficial/Windows											
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	N	95.7	95.4	95.0	94.7	94.4	-	95.7	95.4	95.0	94.7	94.4	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Julho 2008	SE	79.5	78.7	77.7	76.8	75.7	-	79.5	78.7	77.8	76.8	75.7	-	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	-
	S	63.5	65.4	64.4	63.2	60.9	-	63.6	65.3	64.2	63.0	60.8	-	-0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	-
	NE	76.9	74.4	72.3	69.9	67.4	-	76.9	74.4	72.3	69.9	67.4	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	89.1	86.6	84.2	81.7	79.1	-	89.1	86.6	84.2	81.7	79.1	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Agosto 2008	SE	73.7	72.2	70.7	69.0	67.3	65.7	73.7	72.2	70.7	69.1	67.4	65.7	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0
	S	56.4	55.3	53.7	52.3	50.4	47.9	56.4	55.3	53.7	51.5	49.8	47.2	0.0	0.0	0.0	1.6	1.2	1.5
	NE	72.5	69.8	67.1	64.4	61.6	58.7	72.5	69.7	67.1	64.4	61.5	58.6	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2
	N	75.9	72.4	68.9	65.5	62.1	58.8	75.9	72.4	68.9	65.5	62.1	58.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Setembro 2008	SE	65.2	64.2	63.1	62.0	60.8	-	65.2	64.2	63.1	62.1	60.8	-	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.0	-
	S	61.9	61.7	64.0	66.3	67.7	-	61.8	61.5	63.9	66.2	67.7	-	0.2	0.3	0.2	0.2	0.0	-
	NE	61.2	57.9	54.5	51.2	47.9	-	61.3	57.9	54.5	51.2	47.8	-	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	-
	N	60.5	56.7	53.0	49.2	46.0	-	60.4	56.6	52.8	49.2	46.0	-	0.2	0.2	0.4	0.0	0.0	-
Outubro 2008	SE	57.5	56.0	54.7	53.4	52.2	-	57.5	56.0	54.6	53.4	52.2	-	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	-
	S	54.8	56.3	56.8	58.0	59.2	-	54.8	56.5	57.0	58.3	59.6	-	0.0	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-
	NE	52.7	49.4	46.1	42.7	39.4	-	52.7	49.4	46.1	42.6	39.3	-	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	-
	N	45.3	42.0	38.9	36.0	33.3	-	45.3	42.2	39.1	36.2	33.4	-	0.0	-0.5	-0.5	-0.6	-0.3	-
Novembro 2008	SE	51.2	50.5	50.1	49.8	49.7	-	51.2	50.5	50.1	49.8	49.7	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	S	94.4	95.1	97.4	96.4	92.8	-	94.5	95.1	97.4	96.5	92.9	-	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-
	NE	40.8	37.6	34.9	33.6	32.6	-	40.9	37.7	35.0	33.6	32.5	-	-0.2	-0.3	-0.3	0.0	0.3	-
	N	30.1	28.3	26.6	25.0	23.9	-	30.1	28.3	26.6	25.0	23.9	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Dezembro 2008	SE	49.6	49.9	50.8	52.4	54.3	-	49.6	50.0	50.8	52.4	54.4	-	0.0	-0.2	0.0	0.0	-0.2	-
	S	91.7	88.0	83.8	82.0	77.7	-	91.7	87.6	83.6	82.3	78.1	-	0.0	0.5	0.2	-0.4	-0.5	-
	NE	35.0	33.8	33.0	32.8	33.5	-	35.0	33.8	32.9	32.5	33.2	-	0.0	0.0	0.3	0.9	0.9	-
	N	24.1	23.3	22.7	22.4	22.7	-	24.1	23.3	22.7	22.4	22.7	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Janeiro 2009	SE	55.6	58.6	61.3	63.9	66.7	69.7	55.7	58.6	61.3	63.9	66.7	69.8	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	S	79.6	79.1	80.0	81.6	83.9	87.9	79.5	79.3	80.2	82.1	84.0	87.3	0.1	-0.3	-0.2	-0.6	-0.1	-
	NE	42.5	45.0	47.6	49.7	50.5	52.3	42.5	45.0	47.6	49.7	50.5	52.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	N	32.8	34.3	36.3	40.1	45.8	53.3	32.8	34.3	36.3	40.1	45.8	53.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-

Pode-se observar que apenas quatro diferenças foram superiores a 1%. Tal qual o ocorrido com o CMO, estas diferenças foram resultantes dos pontos de operação diferentes das duas soluções. Nota-se que a grande maioria dos valores ficou bem próxima dos valores oficiais.

#### - Verificação dos Resultados do Caso com 2 Meses Estocásticos

O caso teste com 2 meses estocásticos é baseado no PMO de abril de 2008. No arquivo original, o segundo mês possui 193 cenários de afluência, enquanto que neste caso teste foi incluído um terceiro mês com 10 cenários de afluência para cada um dos 193 cenários do segundo mês, totalizando 1930 cenários. Tal qual o que foi feito para os casos de PMO, a verificação dos resultados deste caso consistiu na execução deste caso com diferentes quantidades de processadores e na comparação destes resultados. Como era de se esperar, os resultados obtidos não variaram com a quantidade de processadores utilizados.

A segunda parte da verificação foi a comparação dos resultados das versões 14.9.4 com processamento paralelo no Linux e processamento convencional no Windows. Na Tabela 6 estão mostradas as convergências finais das duas versões, podendo-se observar que, apesar dos casos terem convergido com quantidades de iterações diferentes, os valores finais de  $Z_{inf}$  e  $Z_{sup}$  foram bastantes parecidos.

Tabela 6 - Comparação das Convergências do Caso com 2 Meses Estocásticos

Comparação da Convergência do Processo Iterativo			
Sistema Operacional	$Z_{inf}$	$Z_{sup}$	Iterações
Windows	45502159.5	45502555.9	28
Linux	45519776.9	45519978.6	20
Diferenças (%)	0.0387	0.0383	

#### - Desempenho da Estratégia de Paralelização nos Casos de PMO (RV0)

Nesta etapa do trabalho, executaram-se os casos de PMO, revisão 0, dos meses de janeiro de 2008 até janeiro de 2009, com 1, 2, 4, 8, 16, 24 e 32 processadores. Convém ressaltar que todas as execuções foram feitas simultaneamente. Este fato pode ocasionar uma degradação eventual no desempenho de algum caso, porém não é esperado que esta degradação seja muito significativa. Outra observação importante é que, mesmo que os casos fossem executados de forma isolada, a aplicação não estaria livre da concorrência de programas do sistema operacional e de outros, necessários para a própria execução do DECOMP, que é o caso do MPI. Para estes programas, infelizmente, não existe controle e alguma degradação poderia ser detectada no desempenho da aplicação.

Os tempos de processamento que a versão com processamento paralelo do programa DECOMP levou para executar os casos de PMO estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Tempos de Processamento dos Casos de PMO

Número Procs.	Jan 2008	Fev 2008	Mar 2008	Abr 2008	Mai 2008	Jun 2008	Jul 2008	Ago 2008	Set 2008	Out 2008	Nov 2008	Dez 2008	Jan 2009
1	0:41:05	1:27:21	1:24:34	2:14:41	1:10:57	1:53:13	1:45:12	1:23:56	0:57:41	0:50:53	0:37:05	0:33:08	1:11:53
2	0:22:59	0:47:44	0:45:26	1:12:41	0:37:14	0:57:33	0:52:25	0:47:22	0:30:35	0:27:05	0:19:58	0:18:10	0:40:50
4	0:14:46	0:28:45	0:26:52	0:43:22	0:21:04	0:30:49	0:28:24	0:25:55	0:17:56	0:15:19	0:11:46	0:10:53	0:25:34
8	0:10:13	0:19:15	0:18:07	0:25:33	0:13:12	0:18:07	0:17:27	0:16:41	0:11:51	0:10:15	0:08:08	0:07:44	0:18:31
16	0:08:45	0:14:42	0:13:55	0:17:51	0:09:58	0:12:34	0:11:42	0:12:09	0:09:13	0:08:02	0:06:44	0:06:38	0:15:21
24	0:08:23	0:13:44	0:12:22	0:15:04	0:08:43	0:10:25	0:10:00	0:10:53	0:06:58	0:07:33	0:06:42	0:06:41	0:14:26
32	0:08:08	0:13:02	0:12:13	0:14:13	0:08:38	0:09:03	0:08:40	0:09:46	0:06:18	0:06:50	0:05:48	0:06:16	0:13:37

Para se avaliar esta versão com processamento paralelo foram utilizadas duas medidas de desempenho: o fator de aceleração (*speedup*); e a eficiência. Estas medidas possuem as seguintes expressões [10]:

- Fator de Aceleração (*speedup*)  $\rightarrow S_p = t_1 / t_p$
- Eficiência  $\rightarrow \eta_p = S_p / p \times 100\% = t_1 / (p \cdot t_p) \times 100\%$

Onde:  $S_p$   $\rightarrow$  fator de aceleração (*speedup*) para “p” processadores;  $t_1$   $\rightarrow$  tempo de execução da versão com 1 processador;  $t_p$   $\rightarrow$  tempo de execução da versão com “p” processadores;  $\eta_p$   $\rightarrow$  eficiência da versão com “p” processadores.

Os resultados do desempenho do processamento paralelo da versão 14.9.4 do programa Decomp estão apresentados na Figura 3, para os Fatores de aceleração, e na Figura 4 para as eficiências.

Uma importante conclusão que pode ser tirada destes gráficos: a eficiência do processamento paralelo do programa Decomp depende do caso a ser executado, e essa dependência está diretamente ligada ao número de cenários de aflúncias utilizados a partir do segundo mês. Quanto maior for este número, melhor será o desempenho do processamento paralelo. Ao se observar o processo de solução do programa, esta conclusão é naturalmente esperada. Outra conclusão é que as eficiências vão diminuindo com o aumento da quantidade de processadores utilizada. Este fato também é esperado, uma vez que a comunicação no *cluster*, que são os envios e recebimentos de dados, aumenta com o aumento da quantidade de processadores e isso tende a diminuir a eficiência do processo. Outro ponto que influencia o desempenho é a distribuição de carga entre os processadores. No programa Decomp, a distribuição de carga é estática e definida a priori, sendo calculada levando-se em consideração apenas as quantidades de cenários de vazões e de processadores. O problema é que não se tem idéia de quanto tempo um determinado PPL levará para ser resolvido, o que pode levar alguns processadores a ficarem ociosos, esperando o término do processamento de outro processador. Este problema pode colaborar na diminuição da eficiência da estratégia de processamento paralelo utilizada.

Com relação ao desempenho em sí, pode-se pensar que o mesmo não estaria muito bom, por conta dos percentuais abaixo de 50% para todos os casos com 32 processadores. Porém, convém ressaltar uma característica importante da estratégia de processamento paralelo utilizada no modelo Decomp, que é a existência de uma parte do processamento que não era paralelizável. Este fato acerreta menores fatores de aceleração e eficiências.

#### - Desempenho da Estratégia de Paralelização no Caso com 2 Meses Estocásticos

Para avaliar o desempenho da estratégia de paralelização, o mesmo caso foi executado com 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72 e 80 processadores. Os tempo totais de processamento estão mostrados na Tabela 8, enquanto que os fatores de aceleração (*speedup*) e as eficiências estão mostrados na Figura 5 e na Figura 6.

Tabela 8 – Tempos de Processamento do Caso com 2 Meses Estocásticos

Quantidade de Processadores	1	2	4	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
Tempo	19:42:30	10:02:44	5:12:37	2:58:31	1:42:51	1:16:12	1:03:19	0:51:03	0:46:59	0:41:10	0:39:36	0:38:00	0:36:18

## 5.0 - CONCLUSÕES

O principal objetivo, que era uma versão do programa DECOMP disponível para execução num ambiente de processamento paralelo, foi plenamente realizado. Esta versão apresentou resultados aderentes aos obtidos com a versão oficial com processamento convencional. A redução no tempo de execução do programa, quando utilizado no novo *cluster* do CEPEL é muito significativa, conseguindo-se executar os casos de PMO entre 5min 48s (novembro/2008) e 14min 13s (abril/2008). Esta redução de tempo agilizará a realização de diversos estudos, que antes despenderiam um longo tempo, além de permitir a possibilidade de se incorporar novos desenvolvimentos ao modelo.

Com relação ao caso com 2 meses estocásticos, o ganho de tempo foi ainda maior, pois a eficiência foi de 58% para 32 processadores em comparação com a eficiência 30% do caso de PMO de Abril com os mesmos 32 processadores. Isso indica que o desempenho desta estratégia de paralelização tende a aumentar com o aumento da quantidade de meses estocásticos, permitindo ganhos significativos de tempo com uma quantidade maior de processadores.

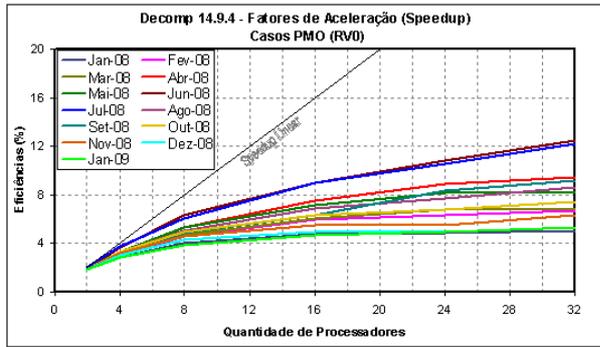


Figura 3 - Speedup do Programa Decomp para os Casos de PMO (RV0)

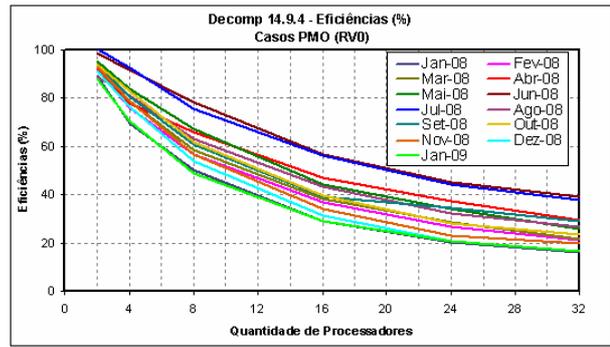


Figura 4 - Eficiências do Programa Decomp para os Casos de PMO (RV0)

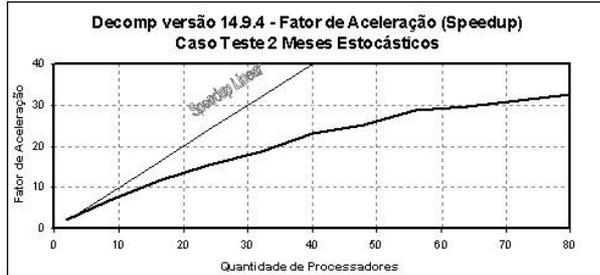


Figura 5 - Speedup do Programa Decomp para o Caso com 2 Meses Estocásticos

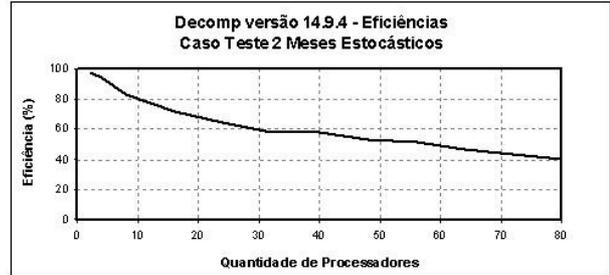


Figura 6 - Eficiências do Programa Decomp para o Caso com 2 Meses Estocásticos

O desempenho do algoritmo de paralelização poderá ainda ser melhorado, para isso novas opções de estratégias de processamento paralelo deverão ser pesquisadas, assim como novas opções de distribuição de carga entre os processadores de forma a minimizar o tempo ocioso dos processadores. Estas possibilidades serão avaliadas em trabalhos futuros.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Maceira, M.E.P., Terry, L.A., Costa, F.S., et al., "Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System", Power System Computation Conference - PSCC'02, Sevilla, Spain, June 24-28, 2002.
- [2] Maceira, M.E.P., Bezerra, C.V., Gorestin, B.G., Cunha, S.H.F., Suanno, C., Sacramento, M.C, Klingerman, A.S., "Aplicação do Modelo na Avaliação Energética da Interligação dos Sistemas Norte/Nordeste e Sul/Sudeste Brasileiros", Proceedings of the VI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Mai 1998, Salvador, Brasil.
- [3] Xavier, L.N.R.; Diniz, A.L.S.L.; Costa, F.S., et al., "Aprimoramento da modelagem da função de produção energética das usinas hidroelétricas no modelo DECOMP: Metodologia e Resultados" Anais XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Nov. 2005.
- [4] A. L. Diniz, T. N. Santos, M. E. P. Maceira, "Short term security constrained hydrothermal scheduling for large scale systems considering transmission losses", X SEPOPE –Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Salvador, Brazil, May 2006.
- [5] MPI Forum, MPI: A Message Passing Interface Standard, Technical Report UT-CS-94-230, Department of Computer Science, Michigan State University, 1994.
- [6] Snir, M., Otto, S., Huss-Lederman, S., Walker, D., e Dongarra, J., "MPI: The Complete Reference - Volume 1 - The MPI Core", MIT Press, 1998.
- [7] Pinto, R.J., Duarte, V.S., Maceira, M.E.P., "Metodologia para Aplicação de Processamento Distribuído no Planejamento da Expansão e Operação", X SEPOPE, 2006, Florianópolis, Brasil.
- [8] R. J. Pinto, A.L.G.P. Sabóia, R.N. Cabral, F.S. Costa, A.L.Diniz e M. E. P. Maceira; "Metodologia para Aplicação de Processamento Distribuído no Planejamento de Curto Prazo da Operação Hidrotérmica", XI SEPOPE, 2009, Belém, PA, Brasil.
- [9] Pereira, M.V.F.; Pinto, L.M.V.G. (1991), "Multi stage stochastic optimization applied to energy planning", Mathematical Programming, 52, pp. 359-375.
- [10] Amdahl, G.M., "Validity of the single-processor approach to achieving large scale computing capabilities", Proceedings of AFIPS Conference, 1967, pp. 483-485.