

# 1 Introdução

A utilização de Programação Dinâmica Estocástica (PDE) para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos foi considerada inviável devido ao mal da dimensionalidade, que ocorre devido ao elevado número de estados obtidos na discretização dos volumes armazenados nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Desta forma, a combinação do número de discretizações e o número de usinas leva a um número de estados a serem analisados igual a  $D^N$  onde  $D$  é o número de discretizações e  $N$  o número de usinas (SILVA, 2001).

Para o caso do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), onde temos cerca de 60 reservatórios. Se forem consideradas 10 discretizações, seriam obtidas  $10^{60}$  estados a serem analisados em cada estágio. No entanto, a técnica de reservatórios equivalentes de energia possibilita a representação do SEB através de 4 subsistemas equivalentes de energia. Com isto, o número de estados a serem analisados passa a ser  $10^4$  para cada estágio. Considerando um horizonte de estudo de 10 anos (120 estágios) e as mesmas 10 discretizações, o número de estados analisado no problema passa a ser de 1.200.000.

Adicionalmente, a modelagem das Funções de Custo Futuro (FCF), que representam o acoplamento entre os estágios do problema de programação dinâmica, apresenta-se como fator importante na obtenção do custo ótimo de operação do problema.

O estudo de métodos que auxiliem na utilização da PDE em problemas de despacho hidrotérmico ótimo torna-se de extrema importância para o setor elétrico.

As técnicas de programação dinâmica dual estocástica (PDDE) contornam o mal da dimensionalidade por não exigir a discretização do espaço de estados (PEREIRA e PINTO, 1985). A PDDE é a técnica oficial utilizada pelo SEB para estudos de planejamento de operação e expansão de médio/longo prazo sendo o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) o responsável pela elaboração do modelo NEWAVE, baseado na PDDE.

MARTINEZ e SOARES (2004) demonstram que a PDDE apresenta, em média, menor geração hidráulica e maior custo operacional quando comparada à PDE, para as usinas do SEB avaliadas.

Outros estudos têm sido desenvolvidos para contornar o mal da dimensionalidade, dentre eles as técnicas de Programação Dinâmica Aproximada (POWELL, 2007).

Além disso, diversas técnicas de inteligência artificial têm sido utilizadas no problema de planejamento hidrotérmico. LEITE *et al.* (2006), utilizam algoritmos genéticos para a determinação da operação ótima, concluindo que esta técnica poderá vir a ser utilizada em caráter alternativo ou complementar no planejamento da operação. Técnicas de otimização *fuzzy* são utilizadas no despacho econômico no intuito de auxiliar as empresas de Geração a determinarem o montante ótimo de energia e reserva a serem vendidos no mercado de energia de forma a maximizarem seus lucros (ATTAVIRIYANUPAP, 2004). Uma abordagem por Redes Neurais que utiliza a discretização eficiente do espaço de estados é sugerida por CERVELLERA (2006).

### 1.1. **Breve Histórico do Planejamento Energético no SEB**

Nesta seção é apresentado um breve histórico do planejamento energético no setor elétrico brasileiro.

O SEB se destaca pela predominância da geração hidráulica, o que representa uma alta dependência das afluências para garantir uma operação eficiente e acima de tudo, segura. Nos últimos anos vem ocorrendo um aumento significativo do percentual de participação térmica na matriz energética brasileira, visando, principalmente, garantir a segurança do abastecimento em momentos de hidrologia desfavorável. Além disso, devido a sua vasta extensão, observa-se a existência de complementaridade hidrológica entre as regiões, conforme visto na Figura 1 (ONS, 2008). Observa-se que a região Sul apresenta um período com maiores precipitações entre os meses de

maio a novembro, período considerado seco para as outras regiões do país, considerando a Média de Longo Termo - MLT.

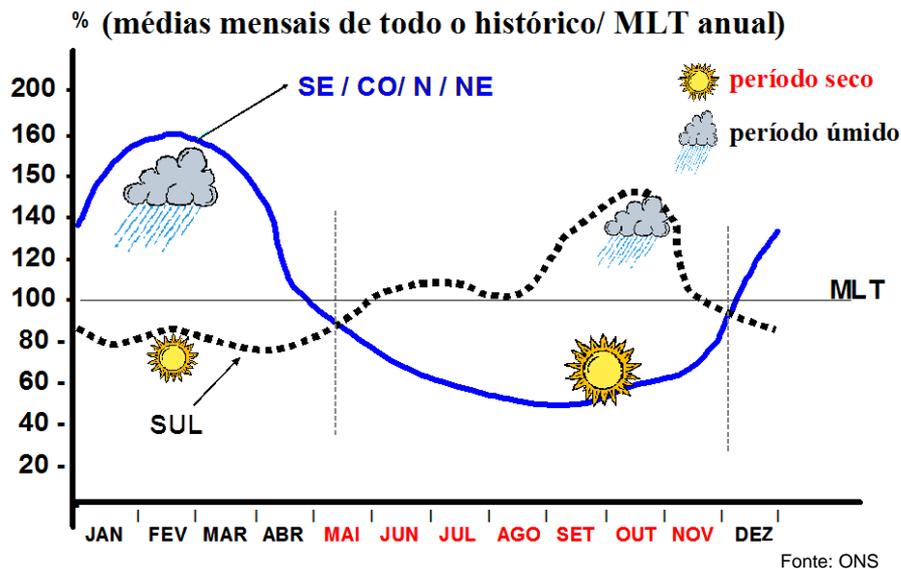


Figura 1: Complementaridade hidrológica dos subsistemas

Entre os anos de 1974 e 1978 era utilizado um modelo de curva-guia baseada na pior série de todo o histórico de vazões (pior seca) para o planejamento energético do sistema elétrico brasileiro. Em 1977, a Eletrobrás e o CEPEL concluíram o desenvolvimento de um modelo baseado em Programação Dinâmica Estocástica - PDE. Este modelo foi adotado a partir de 1979. Ressalta-se que este modelo não considerava o intercâmbio entre as regiões do sistema hidrotérmico por ser o sistema elétrico brasileiro composto por sistemas isolados (TERRY *et al.*, 1986).

A ampliação do sistema de transmissão brasileiro, ocorrida ao longo dos anos, resultou no aumento do número de combinações de estados operativos. Este aspecto tornou a metodologia disponível inviável para realizar o planejamento da operação do sistema brasileiro (KLIGERMAN, 1992).

A partir daí, vários estudos foram realizados com o objetivo de considerar os intercâmbios como variáveis de decisão no problema de otimização. Em 1985, foi proposta a Programação Dinâmica Dual Estocástica - PDDE, (PEREIRA e PINTO, 1985), (PEREIRA, 1989). Esta metodologia utiliza a técnica de Decomposição de Benders (BENDERS, 1962) e as afluências são tratadas a partir de um modelo

auto-regressivo periódico (HIPEL e McLEOD, 1994), (MACEIRA e DAMÁZIO, 2004), (MONDAL e WASIMI, 2006). Adicionalmente, os reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN) são agregados em 4 reservatórios equivalentes de energia a fim de evitar o “mal da dimensionalidade” (ARVANITIDIS e ROSING, 1970), (ZAMBELLI *et al.*, 2006).

Esta modelagem é utilizada até hoje, e está implementada nos modelos DECOMP e NEWAVE (MACEIRA, 2002), desenvolvidos pelo CEPEL, os quais são os modelos oficiais do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) para o planejamento da operação de curto e médio prazo respectivamente. O modelo NEWAVE considera o horizonte de médio prazo para o planejamento da operação, o qual contempla 5 anos de estudo com discretização mensal. Neste horizonte, a tendência hidrológica e o armazenamento final dos sistemas equivalentes de cada estágio são considerados como variáveis de estado do problema. A geração de cenários de energias afluentes é realizada pelo modelo auto-regressivo periódico - Par(p) - implementado no modelo GEVAZP, também desenvolvido pelo CEPEL.

Adicionalmente, observa-se que o SEB possui atualmente 133 empreendimentos hidrelétricos em operação, sendo que destas usinas 65 apresentam reservatórios (ONS, 2010), o que representa um problema inviável do ponto de vista computacional considerando o problema em sua forma estocástica, com reservatórios individualizados. Para diminuir a quantidade de variáveis de estado, diminuindo o esforço computacional de forma que o problema seja solucionável em tempo hábil, adota-se a agregação de reservatórios, através do modelo de reservatórios equivalentes (MARCATO, 2002).

A partir da função de custo futuro calculada pelo modelo NEWAVE, o modelo DECOMP utiliza um horizonte de estudo reduzido (12 meses). Este horizonte de estudo é denominado de curto prazo e as características físicas das usinas e do sistema elétrico são mais detalhadas (MACEIRA *et al.*, 2002).

## 1.2. Objetivo

Nesta tese apresenta-se a proposta de desenvolvimento de uma modelagem alternativa para as funções de custo futuro da programação dinâmica estocástica, utilizando uma abordagem linear através de hiperplanos convexos. Para tanto é utilizado o algoritmo de fechos convexos. Busca-se utilizar um número menor de discretizações através da representação destas funções com uma aproximação eficiente. Adicionalmente é investigada a utilização de processamento paralelo na resolução do problema, visando desta forma, viabilizar o uso da programação dinâmica estocástica.

## 1.3. Publicações e Submissões Decorrentes da Pesquisa

### Publicações em periódicos

- “*Stochastic Dynamic Programming Applied to Hydrothermal Power Systems Operation Planning Based on the Convex Hull Algorithm*”, *Mathematical problems in Engineering*, vol. 2010, ISSN: 1024-123X, doi: 1155/2010/390940, 2010.

### Publicações em eventos

- “*Utilização do Algoritmo de Fechos Convexos na Programação Dinâmica Estocástica: Uma Abordagem Preliminar*”, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE, Belém, PA, Brasil, 18 a 21 de maio de 2010.
- “*Convex Hull and Stochastic Dynamic Programming in the Brazilian Optimal Hydrothermal System Operation*”, - abstract - ALIO-INFORMS Joint International Meeting, Buenos Aires, Argentina, 06 a 09 de junho de 2010.

Aceitos para publicação em eventos:

- “*Processamento Paralelo e Algoritmo de Fechos Convexos na Programação Dinâmica Estocástica Aplicada ao Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos*”, Submetido ao XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA) a ser realizado em Setembro de 2010 na cidade de Bonito, MS - Brasil.
- “*Programação dinâmica estocástica aplicada ao planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro através do uso de processamento paralelo*”, submetido ao 42º Simpósio Brasileiro de Pesquisas Operacional (SBPO) a ser realizado em agosto de 2010 na cidade de Bento Gonçalves, RS – Brasil.
- Minicurso: “*A Pesquisa Operacional e o Planejamento de Sistemas Energéticos*”, submetido ao 42º Simpósio Brasileiro de Pesquisas Operacional (SBPO) a ser realizado em agosto de 2010 na cidade de Bento Gonçalves, RS – Brasil.

#### **1.4. Organização da Tese**

Esta tese, apesar de apresentar uma metodologia que pode ser aplicada a qualquer sistema otimizado por PDE, tem como foco o SEB. No capítulo 2 é apresentado o problema do planejamento hidrotérmico, além de uma revisão bibliográfica detalhada a respeito do tema. No capítulo 3 é apresentada a modelagem utilizada para a resolução do problema de planejamento energético de longo prazo, juntamente com o algoritmo proposto, fechos convexos, para a modelagem das funções de custo futuro.

No capítulo 4 são discutidas as técnicas de processamento paralelo com a apresentação de algumas métricas para avaliação de sistemas que utilizam processamento distribuído. Já no capítulo 5 são apresentadas as simulações realizadas com os estudos de casos baseados no SEB.

Por fim, as conclusões, discussões e sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 6.