

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil apresenta dimensão e características que permitem classificá-lo como único em âmbito global. É sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2012).

Sabe-se que uma das principais características dos sistemas de geração com predominância hidráulica é a forte dependência dos regimes hidrológicos. Assim, o planejamento da operação energética consiste em determinar metas de geração para as usinas hidrelétricas e termelétricas para cada estágio (período ou horizonte de simulação) ao longo do horizonte de estudo, atendendo à demanda de energia elétrica, às restrições operativas das usinas e às restrições elétricas do sistema (PEREIRA, 1989).

Em função da dependência dos regimes hidrológicos, a incerteza associada ao planejamento energético no Brasil exige a modelagem estocástica das séries hidrológicas da maneira mais eficaz possível. Percebe-se, portanto, a importância dos modelos de geração de cenários hidrológicos com vistas à otimização do desempenho das operações do sistema, com consequente aumento de benefícios e confiabilidade e, sobretudo, redução de custos (OLIVEIRA, 2010).

1.2 Motivação

O planejamento da operação energética no Brasil é realizado por meio de uma cadeia de modelos matemáticos e computacionais com vistas ao

planejamento da expansão da geração e programação da operação nos horizontes de longo, médio e curto prazos. Estes modelos foram concebidos entre as décadas de 70 e 80 e implementados na década de 90 (SOARES, 2006). No limite, o objetivo destes modelos é a minimização do valor esperado do custo total de operação.

O modelo empregado no planejamento da operação energética de médio prazo no Brasil é o NEWAVE, (CEPEL, 2001). Este define, para cada mês do período de planejamento, que pode variar de 5 a 10 anos, a alocação ótima dos recursos hídricos e térmicos de forma a minimizar o valor esperado do custo de operação. O parque hidrelétrico é representado de forma agregada e o cálculo da política de operação é baseado na Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), (MARCATO, 2002).

O modelo NEWAVE também permite a representação estática ou dinâmica da configuração do sistema, discretização do mercado de energia em até três patamares (por exemplo, pesada, média e leve), representação dos cortes no suprimento em até quatro patamares de déficit, além da consideração de diversos cenários de energias afluentes, obtidos por meio de simulações estocásticas empregando modelos autorregressivos periódicos, $PAR(p)$, (THOMAS & FIERING, 1962). No modelo NEWAVE, a formulação do problema é baseada em sistemas equivalentes de energia, que são os quatro subsistemas que compõem o SIN. Nesta formulação, as séries hidrológicas são transformadas em Energia Natural Afluente (ENA) (OLIVEIRA, 2010). A definição formal dessa variável será apresentada adiante.

No contexto desta Tese, é imperativo ressaltar que todo o desenvolvimento da modelagem proposta e o tratamento das fases estocástica e de otimização será realizado por meio dos *softwares* desenvolvidos no projeto de P&D Estratégico proposto pela ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, em 2008, e desenvolvido pela PUC-Rio e pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Este projeto, intitulado de “MDDH - Modelo de Otimização do Despacho Hidrotérmico” - desenvolveu, ao longo de dois anos de pesquisa, e teve como produto final uma plataforma computacional completa para tratar do despacho hidrotérmico no Brasil. Esta plataforma computacional contém dois grandes módulos: o primeiro, que trata da parte do tratamento estocástico das séries de

ENA através do modelo PAR, e o segundo, no qual estão implementados os algoritmos da técnica de PDDE.

A modelagem estocástica da ENA é realizada pelo PAR (p), que ajusta um modelo autorregressivo de ordem p para cada um dos estágios das séries hidrológicas históricas que compõem as configurações do sistema. Nas simulações de cenários, a versão vigente do NEWAVE emprega uma transformação Lognormal para a geração das séries sintéticas, o que, de acordo com (OLIVEIRA, 2010), pode gerar uma não convexidade no modelo empregado na PDDE. A utilização da Distribuição Lognormal no contexto da simulação de cenários hidrológicos se dá em função da garantia de geração de valores não negativos para qualquer realização da variável estocástica.

Na literatura recente estão disponíveis alguns modelos alternativos ao vigente aplicados ao contexto do planejamento da operação de médio prazo. Em (SOUZA, et al., 2012), os autores propõem nova abordagem que utiliza a técnica de *Bootstrap*, (EFRON & TIBSHIRANI, 1993) e de PDE-Convex Hull (DIAS, et al., 2010). Em (CASTRO, 2012) é apresentada uma alternativa que conjuga o modelo proposto por (OLIVEIRA, 2010) e a técnica de PDDE.

Deste modo, o desenvolvimento de um modelo gerador de cenários hidrológicos que atendam às necessidades do planejamento da operação de médio prazo sem a utilização de estratégias metodológicas que possam gerar não convexidades na função objetivo do problema de otimização, foi o principal motivador para a realização deste trabalho. Destaca-se ainda a possibilidade de utilização da metodologia proposta na geração de cenários de energia eólica.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo propor uma nova abordagem metodológica para a geração de séries sintéticas que compõem árvores de cenários utilizadas em modelos de otimização estocástica. Particularmente, a aplicação do modelo proposto se dá no planejamento da operação energética de médio prazo do Brasil, através da PDDE. Neste contexto, em trabalhos disponíveis na literatura, os mecanismos de simulação das realizações da variável estocástica em questão causam uma estrutura não linear no modelo gerador, o que pode ocasionar não

convexidade indesejável na construção da função objetivo do processo de otimização estocástica.

Desta forma, objetiva-se desenvolver uma metodologia mais adequada ao problema, pormenorizando alguns pontos importantes não levantados nos trabalhos disponíveis na literatura quanto à árvore de cenários simulada e a qualidade da mesma nos passos *Forward* e *Backward*. Através da associação de diferentes métodos de simulação aplicados às fases da construção da árvore de cenários, a partir da premissa de considerações e modelagens específicas no que tange às variáveis estocásticas utilizadas nestes procedimentos, a metodologia apresentada nesta Tese não ocasiona quaisquer não linearidades ou não convexidades ao problema de otimização.

1.4 **Descrição do Trabalho**

O desenvolvimento deste trabalho se inicia com uma vasta revisão bibliográfica acerca do planejamento da operação de médio prazo, suas características e principais ferramentas empregadas no Setor Elétrico Brasileiro - SEB. O entendimento do problema a ser investigado e o enquadramento do mesmo na cadeia de processos da modelagem empregados no NEWAVE foi o segundo passo da sequência metodológica empregada. A partir desta fase, os principais pontos passíveis de melhorias são objeto de discussão para que, finalmente, fosse possível a proposição de uma nova alternativa metodológica para a formulação do problema em questão.

A proposta de construção e geração da árvore de cenários fará uso de técnicas não paramétricas e simulação de Monte Carlo, partindo da premissa - que será justificada nos próximos capítulos - de que a amostra de ruídos empregados nos passos *Forward* e *Backward* pode ser diferente, desde que visite as mesmas regiões da distribuição de probabilidades do processo estocástico gerador, o que não ocorre no modelo vigente. Assim, inicialmente será estabelecida uma formulação teórica para a modelagem do problema e, posteriormente, testes comparativos serão realizados com vistas à avaliação da qualidade, do ponto de vista de conservação das propriedades estatísticas da árvore de cenários gerada e seu comportamento na fase de otimização, realizada pela PDDE. É importante

ressaltar que os detalhes teóricos referentes à PDDE não fazem parte deste trabalho, que se concentra na primeira fase do planejamento da operação, a etapa *estocástica*.

1.5 Publicações relacionadas

Durante o processo de consolidação desta Tese foram submetidos diversos trabalhos (em periódicos e congressos nacionais e internacionais) com participação do autor acerca dos modelos de planejamento do SEB e que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa e da modelagem proposta.

OLIVEIRA, F. L. C. & SOUZA, R. C., 2011. A new approach to identify the structural order of par (p) models. *Pesquisa Operacional*, 31(3), pp. 487-498.

SOUZA, R. C., MARCATO, A. L. M., DIAS, B. H. & OLIVEIRA, F. L. C., 2012. Optimal Operation of Hydrothermal Systems with Hydrological Scenario Generaton through Bootstrap and Periodic Autorregressive Models. *European Journal of Operational Research*, 222(3), pp. 606-615.

OLIVEIRA, F. L. C.; SOUZA, R. C., 2010. New approach to generating streamflow scenario to long-term energetic operation planning. *ALIO-INFORMS Joint International Meeting*, Buenos Aires, Argentina.

OLIVEIRA, F. L. C.; SOUZA, R. C., 2010. New approach to identification of the order “p” in the periodic autoregressive model, PAR(p), to generating streamflow scenarios. *The 30th Annual International Symposium on Forecasting*, San Diego, USA.

OLIVEIRA, F. L. C.; CALILI, R. F.; FERREIRA, P. G. C.; MIRANDA, C. V.; SOUZA, R. C., 2010 Critérios de identificação da ordem do modelo autorregressivo periódico. *42º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Bento Gonçalves, Brasil.

OLIVEIRA, F. L. C; CALILI, R. F.; FERREIRA, P. G. C.; PEREIRA, G. A. A; SOUZA, R. C., 2010. *Bootstrap* para estimação dos parâmetros fracionários em modelos de memória longa aplicados a séries de vazão. *Encontro Regional de Pesquisa Operacional – Sudeste*, Brasil.

OLIVEIRA, F. L. C.; CALILI, R. F.; FERREIRA, P. G. C.; PEREIRA, G. A. A.; SOUZA, R. C., 2010. Implementação de *Bootstrap* na estimação de parâmetros em modelos autorregressivos periódicos. *Encontro Regional de Pesquisa Operacional – Sudeste, Brasil*.

OLIVEIRA, F. L. C.; SOUZA, R. C., 2011. Modelling periodic autoregressive structures using Bootstrap. *The 31th Annual International Symposium on Forecasting, Prague, Czech Republic*.

OLIVEIRA, F. L. C.; CALILI, R. F. C.; FERREIRA, P. G. C.; PEREIRA, G. A. A.; SOUZA, R. C., 2011. Critérios Tratamento estocástico do despacho hidrotérmico no Brasil. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Ubatuba, Brasil*.

OLIVEIRA, F. L. C.; SOUZA, R. C., 2012. Modeling climate phenomena in hydrological time series using a stochastic hybrid model. *The 32th Annual International Symposium on Forecasting, Boston, USA*.

OLIVEIRA, F. L. C.; FERREIRA, P. G. C.; SOUZA, R. C., 2012. Autoregressive periodic model applied to the generation of synthetic scenarios, incorporating the impact of climate phenomena through SOI index. *European Conference on Operational Research, Vilnius, Lithuania*.

OLIVEIRA, F. L. C.; FERREIRA, P. G. C.; SOUZA, R. C., 2012. Brazilian Electric Sector (BES); its stochasticity and the use of the PAR(p) model for natural inflow energy simulations. *International Workshop on Energy Efficiency for a More Sustainable World, Ponta Delgada, Azores, Portugal*.

OLIVEIRA, F. L. C.; FERREIRA, P. G. C.; SOUZA, R. C., 2013. The use of Bootstrap in stochastic simulations models applied to hydrology. *International Symposium on Operation Research and Applications, Marrakesh, Marrocos*.

OLIVEIRA, F. L. C.; SOUZA, R. C., 2013. A Model To Scenarios Trees Generation Using A Non Parametric Technique And Monte Carlo Simulation. *33rd International Symposium on Forecasting, Seoul, South Korea*.

OLIVEIRA, F. L. C.; SOUZA, R. C., 2013. New Approach for Stochastic Scenarios Trees Construction Applied to Energy Planning. *26th European Conference on Operational Research, Roma, Italy*.

OLIVEIRA, F. L. C.; FERREIRA, P. G. C.; SOUZA, R. C., 2013. Modelo Híbrido para Geração de Árvores de Cenários Aplicado ao Planejamento do Despacho Hidrotérmico Brasileiro. *XLV SBPO, Natal, Brasil*.

1.6 Organização da Tese

Este documento está organizado em seis capítulos, iniciados por esta Introdução, que aborda as considerações iniciais, motivação, objetivo, descrição do trabalho e publicações relacionadas.

O Capítulo 2 descreve o planejamento da operação energética de médio prazo de sistemas hidrotérmicos no contexto do SEB, abordando a formulação do problema, o critério de otimização e a cadeia de modelos vigentes atualmente no SEB, caracterizando e justificando a representação em reservatórios equivalentes de energia.

A seguir, no Capítulo 3, é apresentada a técnica de Programação Dinâmica aplicada ao contexto do planejamento da operação hidrotérmica. Embora o foco desta Tese seja a fase estocástica do problema, o entendimento do modelo de otimização empregado e a contextualização da incerteza associada são fundamentais para a estruturação adequada da abordagem proposta.

No Capítulo 4, é apresentada a representação da incerteza hidrológica no planejamento da operação, caracterizando a construção da árvore de cenários, o modelo estocástico gerador de séries sintéticas e as implicações desta modelagem na PDDE.

No Capítulo 5, inicialmente são apontadas e justificadas as possíveis dificuldades da abordagem sugerida por (OLIVEIRA, 2010) e o modelo alternativo proposto é apresentado. Em seguida é realizada uma revisão bibliográfica acerca de distribuições de probabilidade, as técnicas de ajuste e estimação paramétrica, e os fundamentos teóricos dos modelos de simulação estocástica que serão empregados.

Os testes e resultados são apresentados no Capítulo 6, ressaltando o desempenho do modelo proposto e as implicações no planejamento da operação.

O Capítulo 7 é dedicado às considerações finais e perspectivas de continuação da agenda de pesquisa. Uma breve revisão do trabalho enumera as contribuições do mesmo.

Finalmente, no Capítulo 8 são listadas as referências bibliográficas utilizadas, seguido dos Apêndices do trabalho.