

1 Introdução

1.1. Considerações Iniciais

O problema de planejamento da operação energética de um sistema de geração de energia elétrica hidrotérmico consiste em determinar metas de geração para as usinas hidrelétricas e termelétricas para cada estágio ao longo do horizonte de estudo, atendendo à demanda de energia elétrica, às restrições operativas das usinas e às restrições elétricas do sistema. A determinação da alocação ótima dos recursos hídricos e térmicos é norteadada segundo um determinado critério, como por exemplo, o critério de minimização dos custos globais de produção da energia elétrica, com vistas a modicidade tarifária.

O planejamento da operação energética de um sistema hidrotérmico é uma tarefa difícil e deve ser feita de forma coordenada por se tratar de um problema:

- Acoplado no tempo: os reservatórios das usinas hidrelétricas possuem capacidade limitada de armazenamento e a decisão de geração em um estágio tem como consequência o nível de armazenamento no final do estágio, que será o nível de armazenamento inicial do próximo estágio. Logo, a decisão de geração em um estágio altera o montante disponível de geração para os estágios futuros. Desta forma, surge uma dependência entre a decisão operativa de um determinado período e as decisões futuras.
- Acoplado no espaço: normalmente o parque hidrelétrico está disposto em diversas bacias hidrográficas, com várias usinas hidrelétricas dispostas em uma mesma cascata, onde a operação de usinas a montante afeta a operação das demais usinas a jusante.
- Estocástico: há grande incerteza em relação às afluências futuras, que variam sazonal e regionalmente e podem possuir períodos secos de longa duração. Além disso, existem ainda as incertezas com relação à demanda de energia elétrica.

O problema de planejamento da operação energética deve ainda considerar as restrições operativas associadas às usinas hidrelétricas e termelétricas e as restrições elétricas do sistema.

A princípio pode-se imaginar que a água armazenada nos reservatórios não possui valor associado, logo seria mais vantajoso atender a demanda utilizando primeiramente a água estocada nos reservatórios evitando o acionar de usinas termelétricas, que possuem um custo direto associado ao seu combustível. Porém, considerando que a capacidade de armazenamento em um sistema é limitada pela capacidade de seus reservatórios e que a afluência futura aos aproveitamentos é desconhecida, pode-se dizer que há uma dependência entre a decisão operativa de hoje e os custos operativos do futuro. Na Figura 1 é ilustrada essa dependência.

Na Figura 1 é ilustrada a relação que existe entre uma decisão de despacho tomada no presente e sua consequência no futuro. Se, por exemplo, for tomada uma decisão de utilizar a energia hidrelétrica para atender a demanda presente e, no futuro, ocorrer uma seca (baixas afluências), poderá ser necessário o uso de geração térmica de custo elevado ou, até mesmo, interromper o fornecimento de energia. Logo o custo de operação será elevado. Se, por outro lado, a opção for de atender a demanda presente com geração térmica e no futuro ocorrer uma cheia (afluências altas), poderá ocorrer um vertimento no subsistema, caracterizando um desperdício de energia e consequentemente um aumento desnecessário do custo de operação.

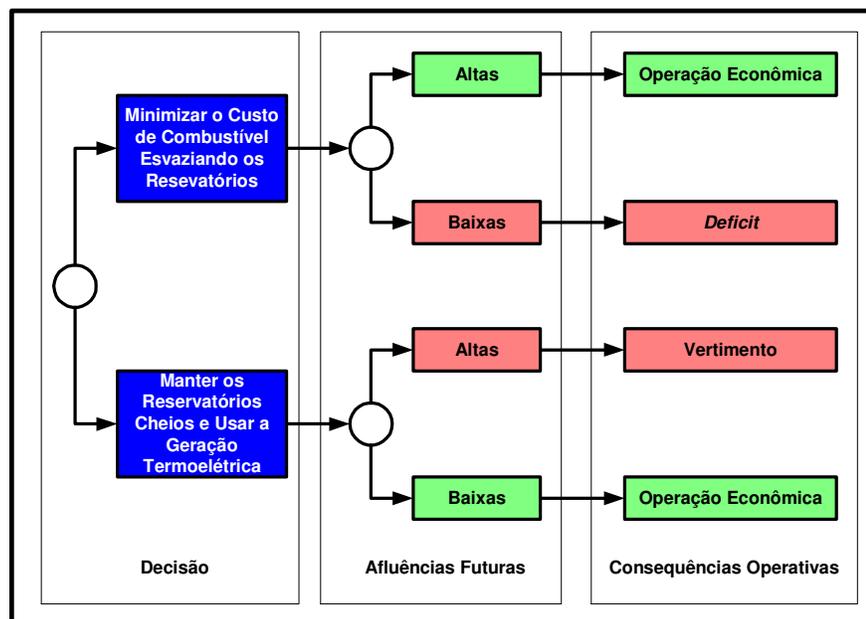


Figura 1: Processo de decisão para um sistema hidrotérmico

Desta forma, em sistemas hidrotérmicos o benefício da utilização da água armazenada nos reservatórios em um determinado estágio é medido em função da economia de combustível das térmicas e déficits futuros.

Devido às incertezas associadas ao problema, ao número de aproveitamentos existentes, a inter-relação entre as decisões tomadas num determinado instante e suas conseqüências futuras, o problema do planejamento da operação energética se torna um problema de difícil solução, principalmente para sistemas de grande porte como o sistema brasileiro.

Por causa do porte e complexidade deste problema é necessária a sua divisão em diferentes etapas. Em cada etapa são utilizados modelos com diferentes graus de detalhamento para a representação do sistema, abrangendo períodos de estudos com horizontes distintos (planejamento da operação de médio prazo, curto prazo e programação da operação diária).

1.2. Contexto do Trabalho

Com as mudanças do marco regulatório em 1999, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) se tornou o responsável pelo planejamento da operação energética do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nessa tarefa o ONS utiliza uma cadeia de modelos matemáticos desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). No eixo principal dessa cadeia estão os modelos NEWAVE, DECOMP e DESSEM¹ que têm como objetivo definir a política ótima de operação para os problemas de médio prazo, curto prazo e programação diária, respectivamente, considerando o critério de minimização dos custos de operação ao longo do horizonte de planejamento.

Para o planejamento da expansão de mais longo prazo (20 a 30 anos) é utilizado o modelo MELP com o objetivo de selecionar dentre uma lista de projetos aqueles que serão candidatos à construção. Com a retomada dos estudos de planejamento da expansão pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o modelo NEWAVE vem sendo utilizado para auxiliar a elaboração dos Planos Decenais de Expansão (PDE).

O modelo de planejamento de médio prazo, NEWAVE, pode considerar um horizonte temporal de 5 a 10 anos com discretização mensal. Para reduzir a dimensionalidade do problema é utilizada uma representação simplificada do

¹ Vale ressaltar que o modelo DESSEM ainda se encontra em fase de validação pelo ONS e pelos agentes do setor elétrico brasileiro

parque gerador, através de sistemas equivalentes de energia. A estocasticidade das aflúências é representada por um número muito grande de cenários hidrológicos gerados sinteticamente por um modelo estocástico periódico autorregressivo de ordem p (PAR(p)). O cálculo da política de operação é baseado na programação dinâmica dual estocástica (PDDE).

No NEWAVE, a política de operação, ou estratégia ótima de operação, é representada pela função de custo futuro e calculada por um processo iterativo para um conjunto de estados (energia armazenada no início do estágio e tendência hidrológica²). Para cada estado, o corte da função de custo futuro corresponde a uma média estimada para um conjunto de aberturas³.

A incerteza referente às aflúências é considerada explicitamente no cálculo da função de custo futuro através da utilização de cenários hidrológicos multivariados. O conjunto de todas as possíveis realizações do processo estocástico de aflúências, ao longo de todo horizonte de planejamento, forma uma árvore de cenários. Esta árvore representa todo o universo probabilístico sobre o qual será efetuado o processo de otimização da operação energética.

Como a árvore de cenários do problema de planejamento de médio prazo possui uma cardinalidade bastante elevada, igual ao número de aberturas elevado ao número de estágios do horizonte de planejamento (normalmente igual 20^{120-1}), torna-se impossível do ponto de vista computacional percorrer completamente a árvore. Portanto, apenas uma porção da árvore (sub-árvore) é percorrida.

Atualmente a sub-árvore é definida utilizando amostragem aleatória simples, porém a seleção aleatória da sub-árvore está submetida às flutuações amostrais podendo-se perceber variações nos resultados ao se aumentar o tamanho da amostragem ou ao se alterar as sementes dos geradores de números aleatórios utilizadas na amostragem.

1.3. Objetivos do Trabalho

Este trabalho propõe um método para definir uma árvore de cenários completa, levando em consideração a representação da dependência temporal e espacial, tal que o espaço de estados relativo ao processo estocástico das aflúências seja coberto da melhor forma possível. A partir da árvore completa de

² O conjunto dos últimos valores observados em uma série hidrológica

³ Conjunto de aflúências utilizada durante a recursão backward

cenários seleciona-se uma sub-árvore adequada à solução do problema por algoritmos da PDDE, que não degrade excessivamente a qualidade de representação da árvore completa, que permita viabilidade computacional, que não traga impactos negativos na convergência do processo iterativo de cálculo da política ótima de operação e que seja robusta a variações no tamanho das amostras e ao uso de diferentes sementes.

Desta maneira, pretende-se melhorar a qualidade da função de custo futuro que é construída pelo NEWAVE e repassada aos demais modelos da cadeia de planejamento energético e produzir resultados mais robustos de forma que pequenas variações na árvore de afluências não ocasionem grandes variações na solução do problema.

1.4. Metodologia Proposta

Para a definição da árvore completa e da sub-árvore a ser visitada durante o processo do cálculo da estratégia ótima de operação serão empregadas no modelo de geração de cenários hidrológico:

- Técnicas de seleção de cenários: as técnicas de agregação de cenários, quando aplicadas a um grande número de cenários hidrológicos gerados, proporcionam a escolha de um conjunto representativo de cenários.
- Técnicas de amostragem: são propostos métodos que permitam uma forma de amostragem mais eficiente utilizando, por exemplo, amostragem estratificada e amostragem descritiva.

Tais técnicas podem ser aplicadas separadamente ou em conjunto com o intuito de representar de forma mais acurada o processo de estocástico de afluências.

Adicionalmente, um procedimento de reamostragem de cenários é aplicado durante o cálculo da política ótima de operação com o objetivo de percorrer uma porção maior da árvore completa de cenários.

1.5. Relevância do Trabalho

No contexto do planejamento da operação energética para o setor elétrico brasileiro, o trabalho proposto nesta tese pode ser utilizado por diversos agentes como: o ONS, na determinação de metas mais robustas para o planejamento

energético de médio prazo; a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), na definição de preços para a energia negociada no mercado a vista; o MME e a EPE, na elaboração dos planos de planejamento da expansão e no cálculo da garantia física para os empreendimentos de geração de energia elétrica; e pelas empresas do setor elétrico, para realização de estudos que auxiliem o processo de tomada de decisão e a elaboração estratégias de ação para o médio prazo.

1.6. Organização do Trabalho

No presente capítulo foi feita uma contextualização do trabalho dentro do setor elétrico, foram apresentados a motivação que levou ao desenvolvimento deste trabalho e, em linhas gerais, a metodologia proposta para definir a árvore de cenários de afluência para o planejamento da operação energética de médio prazo.

No capítulo 2 discute-se o problema de planejamento da operação, em especial do sistema elétrico brasileiro, suas características básicas, as etapas do planejamento da operação e os modelos desenvolvidos para cada uma delas.

No capítulo 3 é apresentado um detalhamento da consideração hidrológica no modelo NEWAVE. Também são discutidas as atuais alternativas para construção da sub-árvore de cenários e os possíveis problemas que podem ocorrer caso a escolha da sub-árvore não seja apropriada.

Em seguida, no capítulo 4 é realizada uma revisão do modelo autorregressivo periódico e da metodologia de identificação, estimação e verificação para o modelo. Este modelo é atualmente utilizado para a geração de cenários hidrológicos para os modelos de planejamento da operação energética do sistema hidrelétrico brasileiro.

No capítulo 5 são descritas as técnicas de seleção de cenários e as técnicas de amostragem propostas para serem aplicadas ao modelo de geração de cenários hidrológicos utilizado no planejamento de médio prazo.

O capítulo 6 constitui a principal contribuição deste trabalho. Nele são apresentadas alternativas para definição da sub-árvore de cenários de afluência utilizando-se os subsídios dados nos capítulos anteriores.

No capítulo 7 é apresentada uma avaliação do ponto de vista hidrológico dos cenários de afluências gerados pelas alternativas propostas no capítulo

anterior. Também é realizada uma avaliação das amostras que são utilizadas nas técnicas de seleção de cenários.

O capítulo 8 são feitos estudos de casos com o SIN, no qual são analisados os resultados do modelo NEWAVE considerando as alternativas propostas no capítulo 6.

No capítulo 9 constam as principais conclusões do trabalho e sugestões para desenvolvimentos futuros.

No Apêndice A é apresentado um detalhamento da formulação do modelo NEWAVE, utilizado no planejamento da operação de médio prazo. Adicionalmente, é feita uma breve descrição da programação dinâmica dual estocástica.

Finalmente, no Apêndice B é apresentada uma complementação da análise dos cenários gerados de energia natural afluyente, e no Apêndice C é realizada uma complementação da avaliação dos resultados do problema de planejamento da operação.