



**XX 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

SIMULAÇÃO MULTI-CRITÉRIO DA OPERAÇÃO HIDRÁULICA DE RESERVATÓRIOS

Marcelo A. Cicogna *
ANHANGUERA EDUCACIONAL

Ieda G. Hidalgo
FEEC/UNICAMP

João E. G. Lopes
FEC/UNICAMP

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a criação e a aplicação de um modelo de simulação para a análise multi-critério da operação de reservatórios e usinas hidrelétricas. Demonstra-se um simulador capaz de auxiliar a avaliação de alternativas para as etapas de programação da operação, operação em tempo real e pós-operação do Sistema Interligado Nacional - SIN. O modelo de simulação possui uma representação detalhada das restrições e características da operação de múltiplos reservatórios em cascata. Apresenta-se também uma análise multi-critério baseada na técnica de *Multi-Criterion Decision Analysis* – MCDA com foco no uso automatizado do simulador na validação e classificação de alternativas operativas. Por fim, um estudo de caso com 94 usinas do SIN permite demonstrar o bom desempenho computacional do modelo de simulação.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas hidrelétricos, Suporte à decisão, Simulação, Análise Multi-Critério.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os agentes do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) têm aplicado investimentos no desenvolvimento de ferramentas para auxílio ao processo de tomada de decisões nas etapas de programação e operação em tempo real dos sistemas hidrelétricos de grande porte. Neste cenário, destaca-se a importância do desenvolvimento de ferramentas de suporte à decisão para a operação hidráulica de reservatórios em horizontes diários ou semanais.

Para as empresas de geração hidrelétrica na execução das atividades de operação hidráulica de reservatórios nas etapas de programação, pré-operação, tempo real e pós-operação, constata-se a necessidade de instrumentos computacionais que sustentem o conhecimento antecipado e detalhado do comportamento das vazões e níveis d'água, estando essas grandezas diretamente associadas ao atendimento da geração e de diversas restrições operativas. Nas etapas citadas, também coloca-se como desafio a análise estruturada de possíveis alternativas operativas, criando um cenário de análise de decisões em ambiente multi-critério (FONTANE et al., 1997).

Dentro deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo de simulação da operação hidráulica capaz de sustentar a diversidade técnica e a dimensão do problema de operação dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN). A formulação matemática e os aspectos do projeto de software são apresentados com ênfase na aplicação prática de tais recursos por outros pesquisadores do SEB.

Os autores acreditam que todo tipo de modelo para operação de reservatórios, principalmente aqueles baseados em programação matemática (otimização), possuem algum grau de simplificação dos aspectos reais do problema (LABADIE, 2004). Do mesmo modo, é difícil encontrar estudos focados na comparação do comportamento de tais modelos. Neste sentido, o modelo a ser apresentado possui recursos avançados de projeto de software orientado

a objetos os quais atribuem a capacidade de simulação de diferentes políticas operativas. Esses recursos podem ser aplicados em estudos de comparação de políticas operativas determinadas por outros modelos de otimização, de simulação, do registro operativo, ou mesmo trajetórias de decisões empíricas criadas por profissionais com longa experiência na operação de reservatórios.

Em complemento ao modelo de simulação, uma análise multi-critério da operação de reservatórios também é apresentada. A análise de múltiplos critérios é baseada no trabalho de Fontane et al. (1997), o qual demonstra um modelo para o planejamento da operação de reservatórios utilizando lógica *fuzzy* e programação dinâmica para determinar uma solução ótima sob objetivos imprecisos.

Um estudo com 94 usinas hidrelétricas é apresentado para demonstrar o desempenho computacional do simulador e delinear os recursos gráficos do sistema de suporte à decisão na criação de estudos e de análises dos resultados.

2.0 - MODELO DE SIMULAÇÃO

Dentre várias demandas, nas etapas de programação e pré-operação, o uso de um modelo de simulação detalhado tem papel importante para a validação da geração programada frente à previsão de vazões afluentes (incrementais ou naturais) aos reservatórios do sistema gerador, ou seja, pode-se checar o atendimento das restrições operativas dos reservatórios dados um cronograma de geração e uma previsão para as vazões afluentes. A implementação computacional de tal modelo, denominado neste trabalho por *simulador*, permite aos tomadores de decisão analisar a evolução no tempo das variáveis operativas e mensurar o benefício ou antecipar dificuldades dentro do plano de operação (LAUDANNA et al., 2005 e 2007).

Na etapa de operação em tempo real, um simulador é de grande valia para a rápida avaliação de alternativas operacionais criadas a partir de situações de emergência ou devido à divergências entre o programa de operação e as condições reais (LAUDANNA et al., 2007).

Numa etapa de análise de pós-operação dos reservatórios, um simulador pode ser empregado para a consolidação do registro operativo por meio de simulações para a reprodução de trajetórias de armazenamento e/ou geração, verificando-se a factibilidade das restrições operativas (HIDALGO et al., 2009).

Dentro do arcabouço de sistemas computacionais, Yeh (1985) define simulação como uma técnica de modelagem usada para estimar o comportamento de um sistema no computador, representando matematicamente todas as características do problema. Wurbs (1993) relatou uma extensa lista de modelos computacionais para a análise de sistemas de reservatórios. Utilizando a categorização formulada por Wurbs, o modelo de simulação apresentado neste trabalho pode ser classificado como um simulador convencional, uma vez que não são utilizadas técnicas de programação matemática para manipulação das variáveis de operação. No entanto, será apresentada uma estrutura computacional para sistemas com múltiplos reservatórios a qual é baseada em algoritmos de fluxo em redes. Essa estrutura baseada na teoria de grafos garante a capacidade de representação da operação conjunta de reservatórios em cascata existentes no SIN, bem como favorece o desempenho computacional do simulador.

2.1 Função de Produção Hidrelétrica

Em se tratando de um simulador em sincronia com os requisitos operativos do SEB, a função de produção hidrelétrica deve representar corretamente os termos não lineares relativos aos níveis d'água de montante e jusante, rendimento e limites para a vazão turbinada. Na Figura 1, apresenta-se um esquema das principais variáveis da função de produção.

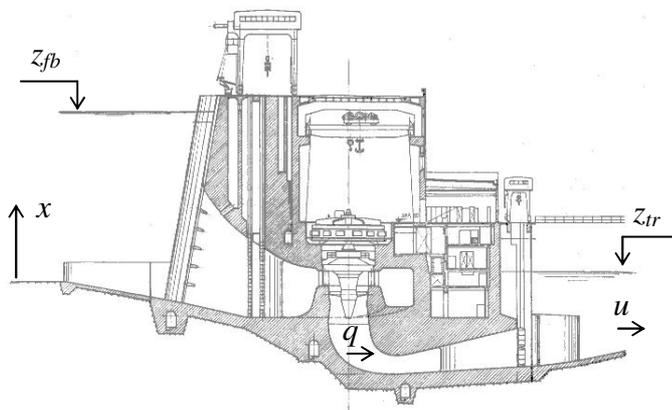


FIGURA 1 – Apresentação das principais variáveis da função de produção hidráulica

A potência hidrelétrica é função da energia potencial criada pelo barramento d'água, ou seja, a potência depende diretamente da diferença das cotas dos níveis d'água de montante e jusante. Adicionando-se o rendimento do processo de transformação de energia, a potência hidrelétrica pode ser calculada como:

$$p = k \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot (h_g - h_{pl}) \cdot q \quad (1)$$

- p potência instantânea obtida pela conversão de energia potencial hidráulica em energia elétrica (MW).
- k constante que engloba a aceleração da gravidade dividida por 10^6 , para que a potência seja expressa em MW. O valor da constante é, portanto, 0.00981 (MW/(m³/s)/m). Cabe salientar que essa constante pode ser utilizada para outras formas de conversão de unidades entre potência e vazão.
- η_T coeficiente adimensional de rendimento do gerador, constante ou função da potência.
- η_G coeficiente adimensional de rendimento da turbina.
- q vazão turbinada total pelas turbinas em operação (m³/s).

Geralmente, o rendimento da turbina pode ser expresso como uma função da altura de queda e da potência. Em alguns casos, nota-se a vazão turbinada em substituição à potência. O simulador aceita como dados de entrada para o cálculo do rendimento da turbina qualquer combinação entre altura de queda bruta ou líquida e potência ou vazão turbinada. Devido ao ser formato, a função de rendimento da turbina é conhecida como *curva-colina*, conforme demonstrado no exemplo da Figura 2a. Os fabricantes normalmente apresentam os dados de rendimento usando curvas de nível e limites operativos máximos e mínimos, conforme ilustrado na Figura 2b. A função de potência máxima é descrita em duas seções: a) para alturas de queda inferiores a h^{ef} , a potência é diretamente proporcional à queda, limitada apenas pela energia potencial disponível; b) quando a altura de queda é superior a h^{ef} , a potência transferida ao gerador pode danificar o equipamento, logo manobras nos distribuidores da turbina são necessárias para manter a potência no patamar máximo de valor nominal do gerador. A altura de queda h^{ef} é chamada de altura de queda efetiva, a qual pode ser bruta ou líquida. Uma função para o limite mínimo de potência em função da altura de queda também pode ser adotado, conforme ilustração da Figura 2b.

Características Operacionais das Turbinas

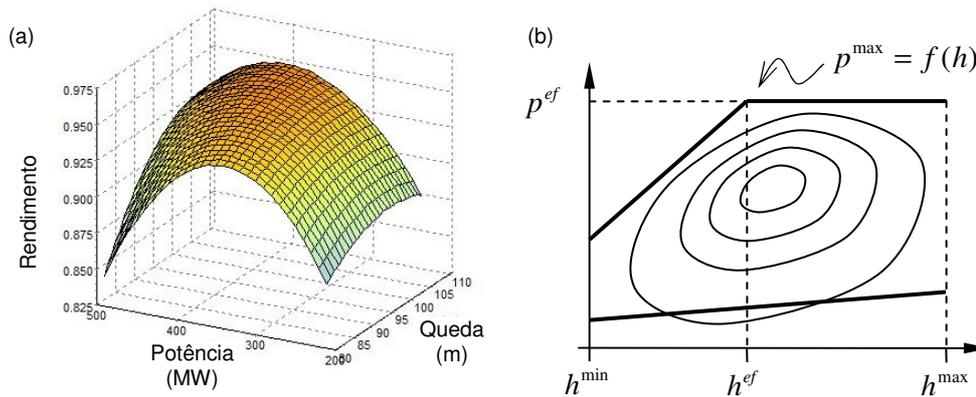


FIGURA 2 – Exemplo da função de rendimento (curva-colina) e dos limites de operação máximo e mínimo.

A altura de queda bruta é calculada como a diferença entre as cotas dos níveis de montante e jusante.

$$h_g = z_{fb}(x) - z_{tr}(u) \quad (2)$$

- h_g altura de queda bruta (m).
- x volume armazenado no reservatório (10^6 m³ ou hm³, hectômetros cúbicos).
- u vazão defluente, resultado da soma da vazão turbinada q e da vazão vertida s (m³/s).
- $z_{fb}(x)$ cota do nível d'água do reservatório (m), montante, expressa como uma função do armazenamento x .
- $z_{tr}(u)$ cota do nível d'água do canal de fuga (m), jusante, expressa como uma função da vazão defluente u .

Tradicionalmente nos modelos do SEB, as variações das cotas dos níveis de montante e jusante, em função do volume e da vazão defluente, respectivamente, são expressas como funções polinomiais de quarto grau.

As estruturas civis de tomada d'água possuem perdas devidas, principalmente, à fricção do fluxo d'água com as paredes das tubulações, comportas e outros obstáculos. Essas perdas podem ser estimadas como funções quadráticas da vazão engolida por cada turbina, conforme a Equação 3.

$$h_{pl} = c \cdot q_n^2 \quad (3)$$

- h_{pl} altura de perdas hidráulicas (m).
 c coeficiente de perda hidráulica (s^2/m^5).
 q_n vazão turbinada por máquina para n máquinas em operação (m^3/s). Numericamente igual a q/n .

Pode-se observar que o modelo de simulação possui uma representação detalhada da operação de usinas hidrelétricas. Na próxima subseção será descrita a modelagem para múltiplos reservatórios.

2.2 Operação Multi-Reservatório

O modelo para simulação da operação de múltiplos reservatórios é baseado na técnica de fluxo em redes denominada *arborescência expandida no tempo*, semelhante à estrutura replicada em árvore apresentada por Rosenthal (1981). Na Figura 3, apresenta-se um exemplo de configuração topológica dos elementos hidráulicos do modelo de simulação. As vazões incrementais apresentadas nesse exemplo são consideradas determinísticas, mas podem ser também resultantes de um estudo ou modelo de previsão de vazões. Os reservatórios podem ser simples (nó 3) ou podem possuir uma casa de máquinas. Componentes chamados *pontos de controle* também podem ser simulados (nó 5), a exemplo dos pontos de controle Porto São José e Régua 11, ambos localizados no Rio Paraná. Estruturas de desvio como apresentado entre os reservatórios 2 e 3, tais como canais e túneis, podem ser configurados sob regras de fluxo por diferença de nível ou por regra definida pelo usuário do simulador. No estudo de caso deste trabalho foram simuladas a operação do canal Pereira Barreto entre os reservatórios da UHE Ilha Solteira (Rio Paraná) e a UHE Três Irmãos (Rio Tietê) e do túnel de desvio entre o reservatório da UHE Segredo (Rio Iguaçu) e o reservatório Jordão (Rio Jordão). Para essas estruturas, o desvio é governado por diferença de nível entre os reservatórios. Considera-se também os limites de velocidade nas estruturas de desvio.

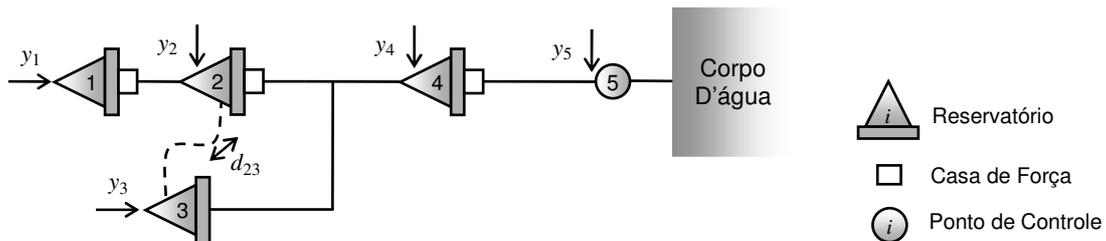


FIGURA 3 – Elementos do modelo de simulação para múltiplos reservatórios.

Para a estrutura de fluxo em rede, a detalhada equação de balanço de massa para cada nó é:

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + \left[y_{i,t} + \sum_{k \in \Omega_i} f_r(u_{k,t-tr}) - (q_{i,t} + s_{i,t} + ev_{i,t} + mu_{i,t} + d_{i,t}) \right] \cdot f_{uc} \quad (4)$$

- i, t índices de aproveitamento e intervalo de tempo, respectivamente. Existem N aproveitamentos e T intervalos. As variáveis de armazenamento x são indexadas em instantes de tempo (inicial $t-1$ e final t). As variáveis de vazão, nível e altura representam valores médios durante um intervalo t qualquer.
- y vazão incremental para o aproveitamento (m^3/s). Aplica-se a UHE, reservatório ou ponto de controle.
- Ω_i conjunto de índices dos aproveitamentos diretamente à montante de i . O efeito de tempo de viagem e amortecimento das vazões de montante, efeito *routing*, é representado pelo atraso de tr intervalos na soma da defluência dos aproveitamentos de montante, ou seja, aplicação de uma função de *routing* f_r .
- s vazão vertida (m^3/s). Aplicam-se limites máximos em função da carga hidráulica acima da soleira.
- ev efeito de evaporação no reservatório durante o intervalo t , calculado como uma vazão de retirada em m^3/s . O cálculo da evaporação leva em consideração o volume médio $(x_t + x_{t-1})/2$ para o intervalo. Como o estado final do reservatório não é conhecido no cálculo do balanço, o cálculo da evaporação é um procedimento iterativo.
- mu representa os usos-múltiplos do reservatórios que podem ser expressos como vazões (m^3/s). Citam-se como exemplos a vazões retirada do reservatório para irrigação e abastecimento.
- d representa vazões desviadas do reservatório por meio de canais ou túneis (m^3/s). As derivações podem ser conectadas a outros reservatórios, rios ou corpos d'água externos ao estudo de simulação.
- f_{uc} é um fator de conversão de unidades entre as grandezas de vazão e volume.

O fator de conversão de unidades f_{uc} é um mecanismo conveniente para permitir ao modelo de simulação considerar vários tipos de duração para os intervalos do horizonte de estudo. Pode-se criar estudos de simulação com horizontes discretizados em intervalos mensais, diários, horários e de 30 minutos, além da possibilidade de criar horizontes com durações mistas ou variáveis. Considerando as unidades de vazão em m³/s e de volume em hm³, o fator de conversão é:

$$f_{uc} = \frac{\Delta t}{10^6} \quad (5)$$

O modelo de simulação possui também restrições operacionais de armazenamento, limite máximo e mínimo para a vazão defluente, vazão turbinada máxima como função da altura de queda e capacidade de vertimento em função da cota do nível d'água do reservatório:

$$x_{i,t}^{\min} \leq x_{i,t} \leq x_{i,t}^{\max} \quad (6)$$

$$u_{i,t}^{\min} \leq u_{i,t} \leq u_{i,t}^{\max} \quad (7)$$

$$p_i^{\min}(h) \leq p_{i,t} \leq p_i^{\max}(h) \quad (8)$$

$$q_{i,t} \leq q_{i,t}^{\max}(h) \quad (9)$$

$$s_{i,t} \leq s_i^{\max}(z_{fb}) \quad (10)$$

As restrições (8) e (9) são limites complementares para a formulação hidrelétrica do item 2.1. É importante observar que o conjunto das restrições de (6) a (10) são indexadas nos intervalos de tempo com o objetivo de representar restrições de usos múltiplos do reservatório, conforme descrição feita na próxima subseção.

2.3 Restrições Hidráulicas de Usos Múltiplos

Normalmente, a operação que atenda a usos múltiplos de reservatórios engloba uma combinação de vários requisitos operativos, tais como a geração hidrelétrica; o abastecimento de água para setores domésticos e industriais; usos de irrigação; o controle ou melhora da qualidade da água em rios e outros mananciais; o controle de cheias e operação em modo de segurança de barragens; a manutenção de condições de navegabilidade e de recreação; e o favorecimento e manutenção de ecossistemas e vida selvagem (YEH e BECKER, 1982).

As restrições operacionais envolvidas com a produção de energia hidrelétrica foram apresentadas nas subseções anteriores. As variáveis de usos múltiplos mu e de estruturas de desvio d apresentadas na Equação (4) permitem a simulação da retirada de vazões para o abastecimento de água e irrigação. As restrições de nível mínimo do reservatório da Equação (6), indexadas para cada intervalo do horizonte de estudo, admitem simular as restrições sazonais de captação de água para abastecimento, irrigação, navegação e recreação. Do mesmo modo, as restrições de nível máximo da Equação (6) permitem a simulação de condições de controle de cheia, as quais são representadas por um volume vazão criado no reservatório como antecipação por vazões afluentes em períodos de cheia. A partir das restrições da Equação (7), podem-se simular as condições mínimas e máximas para manutenção de ecossistemas e de vida selvagem, bem como podem ser representadas as situações de navegabilidade à jusante do barramento e demais restrições associadas ao fluxo d'água em trecho de rio.

2.4 Inventário de Restrições Hidráulicas

Dentro do conjunto de restrições hidráulicas, o simulador possui recursos para armazenamento, configuração e simulação das restrições existentes no *inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos* (ONS, 2009). Os dados das restrições são publicados pelo ONS na forma de documento, não existindo uma estrutura computacional para o armazenamento e gerenciamento dessas restrições. Para tanto, um estudo de categorização e conseqüente modelagem de banco de dados relacional foram realizados. Um sumário destas tarefas é apresentado na Tabela 1, com destaque para a classificação das restrições e para o período de aplicação. Estes dois recursos levaram a uma grande condensação na apresentação do inventário de restrições.

Os intervalos de aplicação fazem referência a informações temporais de validade das restrições como, por exemplo, defluência mínima válida durante o período da piracema (intra-anual) ou para navegabilidade durante a madrugada (intra-diário), restrições que devem ser cheçadas para períodos acumulados de p horas (por exemplo, $p = 1, 4, 6$ e 24). As restrições são armazenadas no banco de dados do sistema, possuindo campos para a descrição textual e técnica, bem como recursos para ativação e/ou determinação de períodos de validade. Cabe salientar que a implementação computacional, baseada no paradigma de orientação a objetos, permite que novas categorias sejam criadas a partir da combinação dos recursos apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Sumário do Inventário de Restrições Hidráulicas

Categoria	Tipo	Operador Lógico	Intervalo de Aplicação	Condição Auxiliar
Cota Nível D'água (z_{fb} e z_{tr})	Montante	$\leq, <, =, >, \geq$	Todos	
	Jusante	$\leq, <, =, >, \geq$	Todos	
Defluência (u)	Máxima	$\leq, <, =$	Todos	$z^{\min} < z_{tr} < z^{\max}$
	Mínima	$=, >, \geq$	Todos, Intra-anual e intra-diário	
Taxa/Variação ($d./dt \leq \delta$)	Defluência	$\leq, <$	Todos ou p horas	$u^{\min} < u < u^{\max}$
	Cota NA	$\leq, <$	Todos	

3.0 - ANÁLISE SOB MÚLTIPLOS CRITÉRIOS

Conforme apresentado nas seções anteriores, o simulador possui uma modelagem detalhada da operação de múltiplos reservatórios com representação do inventário de restrições hidráulicas. No entanto, nas etapas de programação e operação em tempo real, é comum o desafio de se determinar uma decisão frente a um conjunto de alternativas operativas sujeitas a um conjunto de critérios de desempenho. Nesta seção, descreve-se a técnica de *Multi-Criterion Decision Analysis* e a integração deste procedimento com o modelo de simulação, focando a tomada de decisão sob múltiplos critérios (FONTANE et al., 1997).

3.1 Multi-Criterion Decision Analysis (MCDA)

A técnica MCDA é um procedimento estruturado para a análise e documentação do processo de tomada de decisão sujeito a múltiplas alternativas (m) pontuadas por desempenho mensurado a partir de múltiplos critérios (n). Os critérios são associados a níveis relativos de importância. Esta classificação tem como objetivo determinar o impacto da importância relativa dos critérios na avaliação de cada alternativa. Para cada critério i , devem-se determinar uma classificação (*rating*) $R_{i,j}$ para cada alternativa j . Os valores de classificação podem ser obtidos por escalas distintas, podendo-se combinar critérios com desempenho medido em escalas quantitativas e numéricas ou qualitativas como as escalas *Likert*. Na Tabela 2, apresenta-se um exemplo da organização da técnica MCDA para determinar a pontuação de três alternativas sob três critérios. Os três critérios receberam nomes associados a metas operativas comuns para o SIN, com o objetivo de facilitar o entendimento da técnica.

TABELA 2 – Exemplo para a Técnica MCDA

Critérios	Importância Relativa	Peso Normalizado	Alternativas		
			A1	A2	A3
C ₁ : Produção de Energia	I_1	W_1	$R_{1,1}$	$R_{1,2}$	$R_{1,3}$
C ₂ : Meio Ambiente	I_2	W_2	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{2,3}$
C ₃ : Navegação	I_3	W_3	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{3,3}$
	ΣI_i		S_1	S_2	S_3

Por meio de um produto vetorial entre os pesos normalizados $W_i = I_i/\Sigma I_i$ dos critérios e a classificação $R_{i,j}$ das alternativas, a técnica MCDA apresenta uma pontuação (*score*) S_j para cada alternativa. A pontuação é, então, ordenada formando um *ranking* para a tomada de decisão. A pontuação é calculada pela seguinte equação:

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot R_{i,j} \quad (11)$$

Em relação ao exemplo apresentado, cabe destacar que a análise multi-critério MCDA possui um grande número de variantes e também pode ser aplicada a problemas de maior dimensão, chegando-se a dezenas de critérios e alternativas. Para representar problemas reais, também é possível criar sub-critérios com graus de importância relativa inseridos dentro de um critério mestre.

3.2 Decisões Multi-Critério via Simulação

O modelo de simulação pode ser empregado para detalhar, em termos das trajetórias de vazão, níveis, geração, entre outras, as várias alternativas de operação para as usinas e reservatórios do SIN. Uma inovação apresentada neste trabalho é a criação de uma metodologia para determinar automaticamente as classificações $R_{i,j}$ a partir dos

resultados do simulador e do banco de dados de restrições operativas. Baseado no trabalho de Fontane et al. (1997), as classificações são determinadas a partir de funções de pertinência existentes na teoria de conjuntos difusos (*fuzzy sets*), conforme ilustração feita na Figura 4. Nessa figura, faz-se uma apresentação de medidas de desempenho da vazão defluente resultante do simulador em relação às restrições de: a) vazão defluente mínima; b) vazão defluente máxima; e c) meta para vazão defluente. Esses três exemplos de pertinência podem mensurar o atendimento difuso de restrições de navegação e manutenção de vida selvagem e meio ambiente. De forma semelhante, pode-se criar funções de permanência para as demais restrições apresentadas nos itens 2.2 e 2.4.

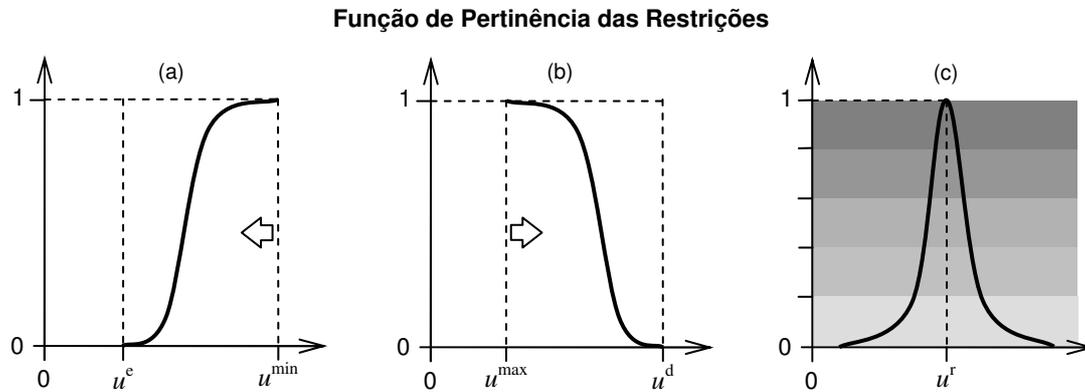


FIGURA 4 – Exemplo de funções de pertinência para classificação (*rating*) de restrições operativas.

A curva de permanência da Figura 4c apresenta uma forma de interpretar a escala real [0, 1] do conjunto difuso nas escalas qualitativas de *Likert* como, por exemplo, [excelente, bom, médio, razoável, fraco]. Com este tipo de medida da classificação das alternativas segundo os critérios considerados, pode-se agilmente extrair dos resultados do simulador os valores para $R_{i,j}$, facilitando o cálculo MCDA e a conseqüente tomada de decisão.

4.0 - ESTUDO DE CASO

Nesta seção descreve-se, brevemente, um estudo de caso sobre 94 reservatórios do SIN, duas estruturas de desvio e dois pontos de controle, conforme denominações feitas no item 2.2. O sistema gerador de teste possui capacidade instalada de 75.944 MW e o horizonte de simulação é semanal com discretização horária.

Como informação principal do teste, para cada usina e para cada intervalo do horizonte, foram fornecidas a programação de geração e a previsão de vazões incrementais. A simulação teve como objetivo confrontar a programação de geração frente à previsão de vazões, determinando o comportamento nas trajetórias de níveis d'água e vazões. Na Figura 5, apresentam-se duas imagens do simulador, nas quais, à esquerda estão os dados de entrada e, à direita, as ferramentas gráficas de análise das trajetórias de operação.

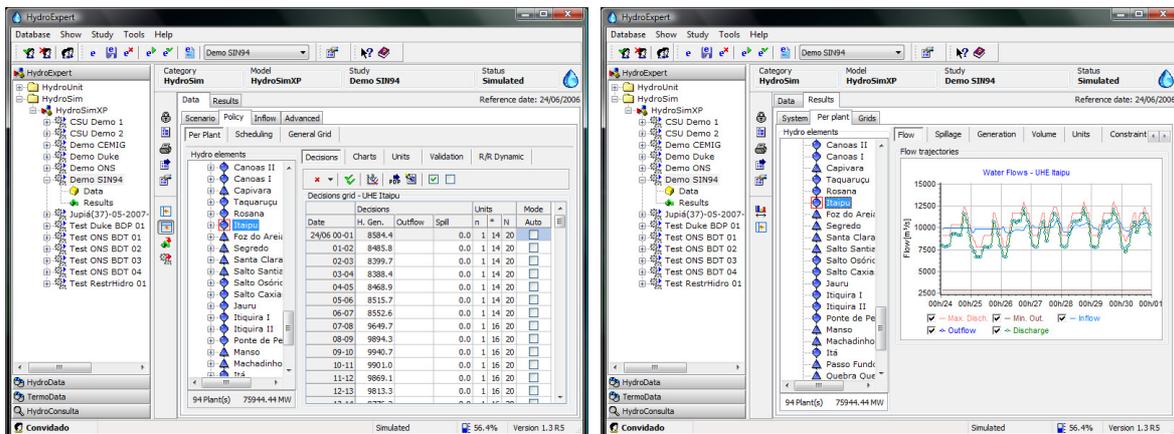


FIGURA 5 – Interface de dados e resultados do simulador.

O teste no simulador foi executado num computador com processador Pentium IV de 3.0 GHz com 2 GBytes de memória RAM. Os 98 elementos simulados no horizonte de 168 intervalos levaram, em média, 2,4 segundos de

tempo de processamento. Pode-se observar o bom desempenho computacional do simulador, principalmente se levado em consideração os detalhes e restrições apresentadas na seção 2.0 como, por exemplo, e o fato de que a conversão da geração programada em vazão turbinada e o cálculo da evaporação levarem a cálculos iterativos.

5.0 - CONCLUSÕES

Este informe técnico apresenta um modelo de simulação para a análise multi-critério da operação conjunta de múltiplos reservatórios e usinas. Faz-se destaque à representação detalhada da operação hidrelétrica baseada em equações não lineares e representação via fluxo em redes da estrutura de reservatórios em cascata. O simulador é capaz de computar em seus resultados a verificação do inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos. Dois recursos simples de modelagem concedem ao simulador o recurso de conversão de unidades e computação de intervalos com duração variável sobre a equação de balanço hidráulico.

Apresenta-se também uma análise baseada na técnica de *Multi-Criterion Decision Analysis* – MCDA para a classificação de alternativas operativas frente à avaliação de desempenho sob cenário de múltiplos critérios. Como inovação, demonstra-se o uso automatizado do simulador na validação e classificação de alternativas operativas a partir de funções de pertinência derivadas da teoria de conjuntos difusos (*fuzzy sets*).

Um estudo de caso com 94 usinas do SIN permite demonstrar a aplicação do simulador na validação de uma programação de geração horária frente aos dados de um modelo de previsão. Por fim, constata-se o bom desempenho computacional do modelo de simulação na determinação das várias trajetórias de operação, sujeito ao cálculo iterativo de conversão de geração em vazão turbinada e considerando vários limites e características operativas das usinas e reservatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FONTANE, D. G., GATES, T. K., MONCADA E. Planning reservoir operations with imprecise objectives. J. Water Resour. Plan. Manage., ASCE, 123(3) 154-162, 1997.
- (2) HIDALGO, I. G., FONTANE, D. G., SOARES FILHO, S., CICOGNA, M. A. A simulator of the hydroelectric plants operation as a tool for analyzing data. Accepted for the 2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering (CSIE), Los Angeles/Anaheim, California, USA, 2009.
- (3) LABADIE J. W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. J. Water Resour. Plan. Manage., ASCE, 130(2), 93-111, 2004.
- (4) LAUDANNA, P. R., COSTA, C. A. S., LOPES, J. E. G., CICOGNA, M. A., MORIBE, C. H., RIBEIRO, T. S. M. T. Integração das Áreas de Planejamento, Tempo Real, Manutenção e Comercial Através de um Sistema de Suporte à Decisão. Anais do IX EDAO - Encontro para Debates de Assuntos de Operação, Rio Quente, mar. 2007.
- (5) LAUDANNA, P. R., COSTA, C. A. S., LOPES, J. E. G., CICOGNA, M. A., MORIBE, C. H. Sistema para a Programação e Operação em Tempo Real de Sistemas Hidrelétricos Baseado em Previsão de Vazões e Simulação Hidráulica de Reservatórios. Anais do XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, out. 2005.
- (6) ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos. Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/restricoes_operativas_hidraulicas.aspx>. Acesso em: 14 jan. 2009.
- (7) ROSENTHAL, R. A nonlinear network flow algorithm for maximization of benefits in a hydroelectric power system. Operation Research. 29(4), 763-786, 1981.
- (8) YEH, W. W-G., BECKER L. Multiobjective analysis of multireservoir operations. Water Resources Research, 18(5), 1326-1336, 1982.
- (9) YEH, W. W-G. Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. Water Resources Research, 21(12), 1797-1818, 1985.
- (10) WURBS, R. A. Reservoir-system simulation and optimization models. J. Water Resour. Plan. Manage., ASCE, 119(4), 455-472, 1993.