

CADERNOS DO IME – Série Estatística

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
ISSN impresso 1413-9022 / ISSN on-line 2317-4536 - v.43, p.1 - 17, 2017
DOI: 10.12957/cadest.2017.31283

SELEÇÃO MULTICRITÉRIO DE ALTERNATIVA DE LOCALIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS E USINAS HIDROELÉTRICAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS CONSIDERANDO PARÂMETROS DE INDIFERENÇA E PREFERÊNCIA

Igor Raupp

CEPEL – Cento de Pesquisas de Energia Elétrica

Fernanda Costa

CEPEL – Cento de Pesquisas de Energia Elétrica
UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Jorge Damazio

CEPEL – Cento de Pesquisas de Energia Elétrica
UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

João Clímaco

INESC/Coimbra – Instituto de Engenharia de Sistema e Computacional de Coimbra

Marcelo Miguez

COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

O arranjo locacional de usinas hidroelétricas a serem construídas numa bacia hidrográfica é definido pelo seu Estudo de Inventário Hidroelétrico. Este artigo apresenta as evoluções para a inclusão da variável socioambiental nos Estudos de Inventário e propõe aperfeiçoamentos visando: (i) a explicitação de que a não exploração de todo o potencial hidrelétrico da bacia pode acarretar na necessidade de utilização de outras fontes para a geração de energia elétrica e que também impactam o meio ambiente, e (ii) a alteração do processo multicritério de tomada de decisão na seleção da melhor alternativa com o intuito de evitar a necessidade de definição de pesos para cada critério. O artigo apresenta ainda quatro casos exemplos para verificar a aplicabilidade dessas propostas.

Palavras-chave: *Análise Multicritério, Estudos de Inventário Hidroelétrico, Impactos Socioambientais, Hidroeletricidade.*

1. Introdução

O Brasil vem aproveitando seu potencial hidrelétrico de maneira a tornar o país autosuficiente em energia elétrica, com base em uma fonte limpa, renovável e de baixo custo (MME, 2007). O grande potencial hidroelétrico das bacias hidrográficas brasileiras (~ 250.000 MW) está sendo progressivamente explorado desde o início do século passado e hoje, com 38% do potencial já explorado, esse tipo de geração de eletricidade representa 65% da matriz de energia elétrica brasileira, com mais de 200 usinas hidrelétricas com capacidade superior a 30 MW em operação. O planejamento do aproveitamento do potencial hidrelétrico de bacias hidrográficas envolve o planejamento do uso da água, uma vez que este recurso é utilizado como insumo para a produção de eletricidade, colocando-se no contexto dos demais usuários da água.

O planejamento da expansão hidrelétrica no Brasil é feito através de uma série de estudos que consideram diferentes horizontes temporais e aproximações sucessivas (COSTA *et al.*, 2011). O ciclo de estudos para implantação de aproveitamentos hidrelétricos é composto de cinco etapas. Os Estudos de Inventário consistem na segunda etapa, precedida apenas pela Estimativa do Potencial Hidrelétrico, baseada em dados disponíveis, permitindo uma primeira avaliação do potencial da bacia. O Estudo de Inventário se caracteriza pela concepção e análise de diferentes alternativas de arranjo locacional de conjunto de aproveitamentos hidrolétricos (reservatórios e usinas) a serem construídos na bacia estudada para o aproveitamento das quedas (diferenças de altitude) disponíveis na bacia. Cada alternativa de arranjo locacional de aproveitamentos hidrelétricos é chamada de alternativa de divisão de quedas. As alternativas concebidas são comparadas entre si, com o objetivo dos Estudos de selecionar aquela que apresente o melhor balanço entre os custos de implantação, benefícios energéticos e impactos socioambientais. Estas avaliações são feitas através do índice custo-benefício e índices de impactos socioambientais negativos e positivos, conforme preconizado no Manual de Inventário Hidrelétrico edição 2007 (MME, 2007).

A localização dos Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas, no início do processo decisório do Planejamento da Expansão Energética, faz com que esses tenham caráter estratégico, pois neste momento ainda não foram comprometidos recursos com a implantação de nenhum dos futuros aproveitamentos hidrelétricos que irão compor a divisão de queda da bacia. Portanto, é neste momento que todas as possíveis alternativas

de divisão de queda da bacia devem ser levantadas e estudadas de forma a se selecionar a que apresentar a melhor eficiência do ponto de vista energético e socioambiental. Os aproveitamentos constituintes da alternativa “vencedora” constituem o potencial hidrelétrico a ser aproveitado ao longo dos anos na bacia e serão posteriormente encaminhados para os respectivos Estudos de Viabilidade.

As metodologias dos Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas sofreram diversas atualizações ao longo do tempo, principalmente, no que se refere à tomada de decisão quanto a melhor alternativa de divisão de quedas. Este artigo apresenta a atual metodologia para seleção da melhor alternativa de divisão de quedas, uma proposta de alteração do critério de impacto socioambiental negativo na análise multicritério e de alteração do método multicritério de apoio a decisão para seleção da melhor alternativa, de modo a evitar a necessidade de definição de pesos relativos específicos para os critérios. O artigo apresenta, ainda, a aplicação desta proposta em quatro casos exemplos.

2. Seleção da Melhor Alternativa de Divisão de Quedas nos Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas

A seleção da melhor alternativa de divisão de quedas dos Estudos de Inventário considera como critério básico a maximização da eficiência econômico-energética, em conjunto com a minimização dos impactos socioambientais negativos, considerando os impactos socioambientais positivos oriundos da implantação dos aproveitamentos hidroelétricos na bacia. As alternativas são hierarquizadas pelo Índice de Preferência Modificado (I') (equação 1) através da soma ponderada dos critérios e, a alternativa que apresentar o menor I' é a alternativa vencedora do Estudo de Inventário.

$$I'_a = (1 - p_{ap}) \cdot \left(p_{cb} \times \frac{ICB_a}{CUR} + p_{an} \times IAN_a \right) + p_{ap} (1 - IAP_a) \quad (1)$$

Onde:

I'_a - índice de preferência modificado da alternativa “a”;

p_{ap} - peso que reflete a importância relativa do impacto socioambiental positivo;

p_{cb} - peso que reflete a importância relativa do objetivo “minimização do índice custo-benefício energético”;

ICB_a - índice custo/benefício energético da alternativa “a”, em R\$/MWh;

CUR - custo unitário de referência, em R\$/MWh;

pan - peso que reflete a importância relativa do objetivo “minimização do índice de impacto socioambiental negativo na bacia”;

IANa - índice de impacto ambiental negativo da alternativa “a”; e

IAPa - índice de impacto socioambiental positivo da alternativa “a”.

Apesar dos contínuos aprimoramentos na metodologia dos Estudos de Inventário, ainda é possível vislumbrar uma lacuna, no que tange a tomada de decisão quanto a escolha da melhor alternativa, conforme constatado por MATOS *et al.* (2013) e CARVALHO (2015). No que diz respeito ao cálculo do ICB, para realizar a comparação das alternativas é feita uma homogeneização dos valores, por meio da complementação da geração de energia associada às alternativas com menor ganho de energia firme, até o maior valor dentre todos. Esta homogeneização permite identificar a alternativa mais atraente sob o ponto de vista estrito da eficiência econômico-energética, considerando o custo do não-aproveitamento de todo o potencial hidrelétrico eficiente disponível na bacia. Por outro lado, apesar da metodologia de avaliação dos impactos ambientais negativos para cálculo do IAN apresentar um alto grau de complexidade, esta avaliação considera apenas os impactos dentro da bacia oriundos da instalação dos aproveitamentos hidroelétricos associados à energia firme produzida por cada alternativa, de forma que o impacto socioambiental fora da bacia, referente à geração da complementação energética, que se dará em outra bacia hidrográfica ou utilizando outra fonte de geração de energia elétrica, não é contabilizado.

Identificando que este impacto fora da bacia poderia não ser desprezível e que seria interessante avaliar a relevância de sua inserção na tomada de decisão quanto a melhor alternativa de divisão de quedas, MATOS *et al.* (2013) propuseram uma forma de calcular e de considerar tal impacto na tomada de decisão tendo como objetivo explicitar aos tomadores de decisão e à sociedade como um todo que, ao abrir mão de um potencial hidrelétrico eficiente sob o ponto de vista econômico-energético, está se optando por produzir a mesma energia por meio de outra fonte, ou em outra bacia hidrográfica, o que também produz impactos socioambientais específicos.

Para a incorporação do impacto socioambiental negativo fora da bacia na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, MATOS *et al.* (2013) sugeriu três abordagens, considerando a criação de um índice de impacto socioambiental negativo modificado (IAN*), que leva em consideração o impacto socioambiental dentro e fora da bacia. Das

três abordagens, este artigo considera como a mais adequada a abordagem que se assemelha ao cálculo do ICB, conforme equação 2.

$$IAN^*_a = \frac{IAN_a \times \Delta Ef_a + (\Delta Ef^* - \Delta Ef_a) \times IAEXP}{\Delta Ef^*} \quad (2)$$

Onde:

IAN^*_a - índice de impacto socioambiental negativo modificado da alternativa “a”;

ΔEf_a - energia firme da alternativa “a”;

ΔEf^* - maior energia firme produzida por uma alternativa na bacia em estudo; e

IAEXP - índice representativo do impacto socioambiental negativo da produção de energia elétrica fora da bacia.

Além da proposição de metodologia de consideração do impacto socioambiental negativo fora da bacia, MATOS *et al.* (2013) calcularam o valor do índice representativo deste impacto, denominado IAEXP e que, de acordo com o Plano Nacional de Energia vigente na época (PNE 2030), chegou-se ao valor de 0,57¹.

Para a composição da nota final de cada alternativa de divisão de quedas, e posterior hierarquização para seleção da melhor alternativa, devem ser definidos os pesos específicos para cada um dos critérios. A definição destes pesos é marcada pela subjetividade, sendo natural que diferentes decisores venham atribuir diferentes importâncias relativas aos diversos critérios. Esta possibilidade de possíveis diferentes conjuntos de pesos pode ser tratada como uma incerteza e, devidamente modelada, considerada no processo de hierarquização e seleção da melhor alternativa. O Manual de Inventário não propõe procedimento para considerar a incerteza nos valores atribuídos aos pesos, de forma a levar em conta a subjetividade. Em tempo, a definição dos pesos tem influencia direta na decisão quanto a melhor alternativa.

Um dos objetivos deste trabalho é investigar métodos multicritério alternativos que minimizem esta questão.

Segundo ACOLET (2008), os métodos multicritério de apoio à decisão propõem uma solução que se encaixe sob todos os pontos de vista restritivos do contexto analisado, da maneira mais prática e satisfatória possível, permitindo, conforme BUCHANAN e GARDINER (2003), a priorização de alternativas em um situação de critérios

¹ Até a conclusão deste artigo, ainda não havia sido finalizado o PNE 2050, deste modo, o valor do IAEXP tendo como premissas o PNE2030 continua sendo o mais atual.

conflitantes, buscando satisfazer as restrições com objetivos conflitantes. Segundo CLÍMACO (2004), os estes métodos fogem, assim, do “paradigma do ótimo”.

Estes métodos permitem que as alternativas sejam comparadas, selecionadas ou ordenadas através de um procedimento formal de tomada de decisão. O processo decisório está naturalmente sujeito a preferências, incertezas e interpretações, de maneira que a vantagem dos métodos de suporte a decisão multicritério é justamente torná-lo mais ordenado, objetivo e transparente (ZONENSEIN, 2007).

Existem diversos métodos de Análise Multicritério na literatura, que podem ser divididos de acordo com a suas abordagens: Teoria da utilidade multiatributo ou Critério único de síntese; e Abordagem de sobreclassificação ou superação.

Os Métodos de Critério Único de Síntese, derivados da corrente de pensamento americana, tem como objetivo definir a “melhor” alternativa para a solução do problema e são caracterizados pela agregação de diversos critérios em um único modelo de síntese, admitindo que todas as alternativas são comparáveis. São também denominados de métodos compensatórios, pois admitem a compensação de um menor desempenho de uma alternativa em um determinado critério, por um melhor desempenho em outro critério. Segundo ALMEIDA (2011), esta característica pode favorecer alternativas mais desbalanceadas. Para a solução do problema, são geradas notas para cada alternativa a partir de seu desempenho em cada critério, e as alternativas que obtiverem melhores notas são as mais bem avaliadas. Os principais métodos desta abordagem são: método de Análise Hierárquica AHP (SAATY, 1991) e Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) (KEENEY & RAIFFA, 1993). Outros exemplos de métodos são o VIP Analysis (DIAS & CLIMACO, 2000) e o MACBETH (BANA E COSTA *et al.*, 2005).

O método AHP (Analytic Hierarchy Process), como o próprio nome sugere, se baseia em análise hierárquica, objetivando a seleção ou priorização de alternativas. Para a solução de um problema multicritério, todos os critérios são comparados par a par, com o intuito de hierarquizá-los para posterior comparação das alternativas frente sua performance nos critérios considerados, determinando um ranking total das alternativas. A comparação entre critérios é realizada em uma escala de importância crescente com valores de 1(igualmente preferível) a 9 (preferência absoluta), permitindo considerar critérios qualitativos e quantitativos.

Segundo AZEVEDO *et al.* (2001), a eficácia dos resultados deste método está associada à competência dos avaliadores em emitir os julgamentos de valor, sendo fundamental o profundo conhecimento do problema abordado por parte dos especialistas.

O Método da Teoria da Utilidade Multiatributo, uma extensão da Teoria da Utilidade, mede a utilidade da solução das alternativas, através de uma função matemática, considerando todos os atributos do problema em análise. Este método ordena as alternativas agregando os critérios em um único modelo de síntese, permitindo trade-offs. Baseia-se em duas situações de preferência: Preferência estrita e Indiferença

Diferentemente dos dois métodos citados anteriormente, o VIP Analysis utiliza uma abordagem com parâmetros interdependentes variáveis, tratando os pesos entre critérios como variáveis interdependentes sujeitas as restrições impostas pela estrutura de preferência do decisor. Desta forma, a avaliação das alternativas através da função aditiva também é realizada em função destes parâmetros. A construção dessa função requer que seja fixada uma ordem de importância dos critérios, ou seja, uma ordenação para as constantes de escala. O método permite extrair conclusões a respeito das alternativas sem a necessidade de atribuição de pesos (CAMPOS *et al.*, 2006).

O método MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), ao contrário do método AHP, considera apenas julgamentos qualitativos (escala nominal) nas comparações par a par para ajudar a quantificar a atratividade relativa das alternativas, uma vez que, admite que o decisor pode incorrer em erros ao estabelecer avaliações em escala numérica para critérios subjetivos. A transformação da escala nominal em numérica é feita posteriormente, quando da aplicação do método aditivo para avaliação das alternativas.

Ao contrário dos métodos de critério único de síntese que buscam definir a “melhor” alternativa, os métodos que seguem a abordagem de sobreclassificação ou superação, derivados da corrente de pensamento francesa, admitem a existência de limitações de associação entre o ótimo matemático e a melhor alternativa. Tem como características a utilização de relações de superação ou dominância, baseadas em comparações par a par entre as alternativas, de acordo com seu desempenho em cada critério. São considerados como métodos não compensatórios, em que é melhor avaliada a alternativa que apresentar superioridade na maioria dos critérios. Segundo Almeida (2011), esta abordagem é considerada mais equilibrada, tendo em vista que é escolhida a

alternativa que possuir um desempenho satisfatório na maioria dos critérios. Os principais métodos são: os da família ELECTRE (ROY, 1991) e PROMÉTHÉE (BRANS *et al.*, 1986).

A família ELECTRE (Elimination et Choix Traduisant la Réalité) possui seis métodos, cada um aplicável a uma situação diferente: ELECTRE I e IS para problemas de seleção; ELECTRE TRI para problemas de classificação; e ELECTRE II, III e IV para problemas de ordenação, sendo o ELECTRE IV (HUGANNARD *et al.*, 1982 e VALLÉE *et al.*, 1994) o único que não utiliza peso como medida de importância entre critérios. Os métodos desta família compreendem dois procedimentos principais. O primeiro é a construção de relações de sobreclassificação/superação, através de comparação par a par entre as alternativas, considerando os conceitos básicos de concordância (alternativa “a” é preferível a alternativa “b” em um número significativo de critérios) e discordância (intensidade de preferência de “b” em relação à alternativa “a”, para os critérios, não ultrapassa um limite aceitável). O segundo procedimento é a exploração desta relação de sobreclassificação, onde se aplica um procedimento ou algoritmo para resolver o problema em função da problemática específica abordada.

Assim, como o ELECTRE, a família PROMÉTHÉE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) também possui seis métodos, em geral, aplicados a problemas de ordenação: PROMÉTHÉE I, II, III, IV, V e VI. Neste método, o decisor deve primeiro estabelecer a importância de cada critério através de pesos, para posterior estabelecimento do grau de sobreclassificação de cada par de alternativas. O grau de sobreclassificação para as diferenças observadas entre as duas alternativas em cada critério refere-se à atribuição de valores entre zero e um com a possibilidade de se utilizar seis diferentes funções de preferência.

É importante salientar que os métodos não-compensatórios, consideram os pesos entre critérios como uma medida de importância que cada critério tem para o decisor, diferentemente dos métodos compensatórios que os pesos refletem uma taxa marginal de substituição.

Segundo OLSON (2001), os estudos comparativos entre as diversas modalidades de métodos multicritério demonstram que não existe nenhuma metodologia que se destaque das outras em todos os contextos de decisão envolvendo múltiplos critérios.

Dentre tantas opções, para a seleção do método mais adequado, deve-se avaliar os potenciais candidatos considerando o tipo de situação investigada, os objetivos específicos da decisão do problema, pesando as vantagens e desvantagens de cada método. Podem ser considerados, ainda, a disponibilidade de informações requeridas pelo método e facilidade de aplicação.

4. Escolha do Método Multicritério para Seleção de Alternativa de Divisão de Quedas

Uma crítica que é feita com relação a escolha da melhor alternativa de divisão de quedas dos Estudos de Inventário é quanto a definição dos pesos entre os critérios. De acordo com o Manual de Inventário estes pesos devem ser escolhidos por uma equipe multidisciplinar de modo a refletir os anseios da sociedade. Entretanto, tal escolha se torna uma tarefa subjetiva, podendo, cada estudo de inventário optar por maneiras distintas quanto ao critério para a definição dos pesos, o que torna ainda mais complicada (ou injusta) as comparações de Inventários de bacias distintas.

Considerando o método atual de seleção de alternativas de acordo com o Manual de Inventário, a equipe responsável pelo Estudo de Inventário tem que definir dois pesos: o peso relativo entre os critérios ICB e IAN e o peso relativo entre o índice de preferência e o IAP (neste caso, o Manual de Inventário sugere que o peso do IAP seja no máximo 0,25)

Uma das dificuldades do processo de apoio à decisão é dar valores para as constantes de escala, pois estes valores refletirão as preferências dos decisores e os trade-offs. Para um decisor é difícil quantificar as suas preferências, as preferências podem mudar conforme o processo de apoio à decisão evolui e, em uma situação de decisão em grupo, as opiniões e preferências dos decisores podem divergir frequentemente.

A partir do exposto e pela subjetividade e dificuldade de definição de valores exatos para pesos, neste trabalho, propõe-se uma alteração no método multicritério de apoio a decisão da escolha da melhor alternativa dos Estudos de Inventário. Pretende-se optar por métodos multicritério que superem esta dificuldade e não demandem a definição de valores precisos para os pesos, buscando incorporar a incerteza desta definição na tomada de decisão.

Com isso em mente e a partir do levantamento bibliográfico dos métodos multicritério de apoio a decisão, verificou-se que o método Electre IV é um potencial

candidato. Apesar do objetivo deste método ser ordenar as alternativas, neste caso, ele será utilizado com o intuito de auxiliar na tomada de decisão quanto a melhor alternativa de exploração do potencial hidrelétrico da bacia.

O ELECTRE IV pertence a família ELECTRE, relacionado com a Escola francesa, considerado como métodos mais flexíveis, por aceitar a incomparabilidade entre as alternativas e não necessitar estabelecer uma estruturação hierárquica dos critérios. Estes métodos buscam identificar relações de superação entre as alternativas, que estejam bem definidas para o decisor.

Conforme já mencionado, a maioria dos métodos ELECTRE utiliza pesos relativos nos critérios, com exceção do ELECTRE IV. Segundo HUGANNARD *et al.* (1982) este método utiliza conceitos de superação e pseudocritérios para resolver problemas onde o agente de decisão não quer determinar pesos para os critérios. Dessa forma, obtém-se a solução por meio de uma sequência de relações de superação agrupadas. Para tanto, devem ser informados dois parâmetros: o parâmetro “p” relacionado ao limite de preferência e o parâmetro “q” relacionado ao limite de indiferença. De posse destes dois parâmetros, para cada critério, as alternativas são comparadas par a par e classificadas de acordo com a relação de subordinação apresentada a seguir:

- Indiferença: Relação de equivalência entre as duas alternativas. Quando a diferença do desempenho de duas alternativas em determinado critério for inferior a “q”;
- Preferência Fraca: Relação de duas alternativas entre a indiferença e a preferência estrita. Quando a diferença do desempenho de duas alternativas em determinado critério for superior a “q” e inferior a “p”; e
- Preferência Estrita: Preferência significativa de uma alternativa em relação a outra. Quando a diferença do desempenho de duas alternativas em determinado critério for superior a “p”.

A partir das relações de subordinação entre as alternativas, para cada par de alternativas (a,b) define-se a relação de dominância apresentada abaixo, que permite atribuir um valor para o Índice de Credibilidade (G).

- Quasi-dominância: se a alternativa “a” for preferida ou indiferente a “b” em todos os critérios; e se o número de critérios para os quais o desempenho de “b” é melhor que o de “a” for estritamente inferior ao número de critérios para os quais o desempenho de “a” é melhor que o de “b”. Neste caso, atribui-se

$$G(a,b) = 1,0;$$

- Dominância Canônica: se em nenhum critério “b” for estritamente preferida a “a”; e se o número de critérios para os quais “b” tem uma preferência fraca relativamente a “a” for inferior ou igual ao número de critérios para os quais “a” é estritamente preferido a “b”; e se o número de critérios para os quais o desempenho de “b” for melhor que o de “a” seja estritamente inferior ao número de critérios para os quais o desempenho de “a” for melhor que o de “b”. Neste caso, atribui-se $G(a,b) = 0,8$;
- Pseudo-dominância: se “b” não for preferido a “a” em nenhum critério; e se o número de critérios para os quais “b” tem uma preferência fraca relativamente a “a” for inferior ou igual ao número de critérios para os quais “a” seja estritamente preferido ou tenha uma preferência fraca relativamente a “b”. Neste caso, atribui-se $G(a,b) = 0,6$.
- Sub-dominância: se “b” em nenhum critério for estritamente preferida a “a”. Neste caso, atribui-se $G(a,b) = 0,4$.
- Veto-dominância: se “b” não for estritamente preferida a “a” em nenhum critério; ou se “b” for estritamente preferida a “a” em apenas um critério, mas que este critério não vete a melhor classificação de “a” relativamente a “b” e ainda, que “a” seja estritamente preferida a “b” em pelo menos metade dos critérios. Neste caso, atribui-se $G(a,b) = 0,2$.

De posse dos Índices de Credibilidade entre cada par de alternativas, monta-se a matriz de credibilidade e, posteriormente, a matriz de superação. A matriz de superação quantifica a eficácia de uma alternativa “a” (número de alternativas que “a” subordina), a fraqueza de “a” (número de alternativas que subordinam “a”) e a qualificação de “a” (diferença entre eficácia e fraqueza). A etapa seguinte refere-se a destilação, onde as alternativas são agrupadas em classes ordenadamente, obtendo-se duas pré-ordenações: uma das melhores alternativas para as piores (destilação descendente) e outra das piores para as melhores (destilação ascendente) (FREITAS *et al.*, 2004). A ordenação resultante do método é obtida através da interseção das duas pré-ordenações, conforme as hipóteses a seguir:

- “a” é preferível a “b” (aPb): em uma das pré-ordenações “a” é classificada a frente de “b” e na outra “a” é ao menos tão bem classificada quanto “b”.
- “a” equivalente à “b” (aIb): as duas alternativas pertencem à mesma classe nas duas pré-ordenações; e
- “a” e “b” são incomparáveis (aRb): “a” tem melhor posição que “b” em uma das pré-ordenações e “b” tem melhor posição que “a” na outra.

4. Aplicação

De modo a verificar a eficácia e performance do método, o ELECTRE IV foi aplicado em quatro bacias hidrográficas já inventariadas com o objetivo de selecionar a melhor alternativa de divisão de quedas. Para as três primeiras aplicações, foram utilizados os dados dos Estudos de Inventário das bacias do rio Xingu (ELETROBRAS *et al.*, 2007), do rio Tibagi (EPE/CNEC, 2010) e do rio Tapajós (ELETRONORTE *et al.*, 2008). Porém, como estes Estudos foram realizados no âmbito do Manual de Inventário de 1997, não foi calculado o índice de impacto socioambiental positivo, assim, este benefício não foi considerado nas aplicações. Uma quarta aplicação foi considerada baseando-se no Estudo de Inventário da bacia do Médio Tocantins, de forma a obter um valor para o impacto socioambiental positivo das alternativas, podendo, assim, considerar os três critérios de acordo com o Manual de Inventário de 2007.

Foram consideradas duas aplicações do ELECTRE IV nas quatro bacias, com alteração apenas no valor dos parâmetros de indiferença e preferência. A primeira aplicação considerou o parâmetro de indiferença igual a um desvio-padrão (DP) do desempenho das alternativas em cada critério e o limite de preferência igual a ao valor de dois DPs, e a segunda aplicação considerou dois DPs e três DPs de cada critério, respectivamente, para os parâmetros de indiferença e preferência.

A tabela 1 apresenta os dados de entrada das quatro bacias e a ordenação das alternativas segundo a metodologia do Manual de Inventário (soma ponderada) e as obtidas pelas duas aplicações do método ELECTRE IV. Ressalta-se que na soma ponderada foram utilizados pesos iguais para os critérios ICB e IAN e peso igual a 0,25 para o IAP. Em cinza são indicadas as alternativas vencedoras de cada método.

Tabela 1: Dados de entrada e resultados.

Alternativas	ICB	IAN*	1-IAP	Ordenação		
				Inventário	Electre IV (DP e 2 DP)	Electre IV (2DP e 3DP)
MÉDIO TOCANTINS						
Alt1-toc	0,535	0,629	0,72	1	1	1
Alt2-toc	0,57	0,626	0,77	2	3	3
Alt3-toc	0,543	0,667	0,7	3	3	3
Alt4-toc	0,566	0,644	0,69	4	2	2
Alt5-toc	0,573	0,675	0,66	5	4	4
Alt6-toc	0,611	0,641	0,77	6	5	5
XINGU						

Alternativas	ICB	IAN*	1-IAP	Ordenação		
				Inventário	Electre IV (DP e 2 DP)	Electre IV (2DP e 3DP)
Alt1-x	0,541	0,427	-	2	1	1
Alt2-x	0,584	0,424	-	3	2	1
Alt3-x	0,586	0,36	-	1	3	1
TIBAGI						
Alt1-tib	0,804	0,256	-	1	1	1
Alt2-tib	0,816	0,285	-	2	3	3
Alt3-tib	0,893	0,236	-	3	1	1
Alt4-tib	0,905	0,263	-	4	3	3
Alt5-tib	0,902	0,245	-	5	2	2
Alt6-tib	0,914	0,273	-	6	4	4
TAPAJÓS						
Alt a-tap	0,692	0,508	-	4	3	2
Alt b-tap	0,693	0,469	-	2	4	4
Alt c-tap	0,693	0,452	-	1	1	1
Alt d-tap	0,667	0,529	-	3	2	3

5. Conclusões

Em geral o resultado do ELECTRE IV coincidiu com o resultado da soma ponderada em termos de melhor alternativa e, em alguns casos, com relação a pior alternativa também. Porém, existe uma diferença quanto à ordenação das demais alternativas. É importante salientar que, apesar do objetivo deste método ser a ordenação de alternativas, podem ocorrer incomparabilidades entre alternativas, de forma que não é garantido pelo método a total ordenação das alternativas, caso este, que não ocorreu nas aplicações apresentadas neste artigo. Na definição dos parâmetros do método, optou-se por utilizar medidas do desvio-padrão, de modo a considerar a variabilidade do desempenho das alternativas.

O caso do Xingu foi interessante pois possui 3 alternativas, sendo que uma apresenta o pior ICB e o melhor IAN* (Alt3-x) e uma outra apresenta o melhor ICB e o pior IAN* (Alt1-x). A ordenação pela soma ponderada obteve como melhor alternativa aquela possui a menor soma ponderada (Alt3-x). A primeira execução do ELECTRE IV (considerando como parâmetros 1DP e 2DP) obteve a Alt2-x como melhor alternativa, isto é, ao invés de selecionar uma alternativa “extrema” para um dos critérios, foi selecionada uma alternativa mais equilibrada. Esta é uma característica dos métodos de sobreclassificação, diferente do método da soma ponderada, que permite a compensação

de um pior desempenho de um critério por um melhor desempenho em outro, acarretando, em geral, na seleção de alternativas que são muito boas em apenas um dos critérios. Com relação à segunda execução do ELECTRE IV para esta mesma bacia, não houve diferenciação na ordenação das alternativas, uma vez que o valor dos parâmetros de indiferença (0,080 para IAN* e 0,050 para ICB) foi superior a maior diferença entre o desempenho das alternativas nos dois critérios (0,067, referente a diferença de desempenho das alternativas Alt1-x e Alt3-x no critério IAN* e 0,045 referente a diferença das mesmas alternativas para o critério ICB). Assim, para a utilização do ELECTRE IV na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, cujo objetivo é solucionar uma melhor alternativa, a definição dos valores dos parâmetros de indiferença e preferência têm papel fundamental e deve ser feita de forma criteriosa, pois, em última instância, refletem os limites para os quais os tomadores de decisão consideram que não há diferença entre as alternativas. Se a definição dos valores destes parâmetros for feita corretamente e o resultado levar a indiferença entre as alternativas, demonstrando que elas são indiferentes, ainda assim, como o objetivo dos Estudos de Inventário é selecionar uma alternativa, os valores deste parâmetros podem ser revistos de forma que permitam a diferenciação entre as alternativas, ou adotar um critério adicional para a diferenciação das alternativas.

Com relação à bacia do Tibagi, houve empate quanto à melhor alternativa, nas duas aplicações do método e, assim as observações para o caso da bacia do Xingu também se aplicam. O ELECTRE IV se apresentou como um método promissor na avaliação das alternativas de divisão de quedas dos Estudos de Inventário, para consequente seleção da melhor alternativa, principalmente, por não necessitar definir peso específico para cada critério. A princípio, uma vez que cada bacia possui suas especificidades e vocações, acredita-se que poderiam ser considerados diferentes parâmetros para Estudos de Inventário distintos, porém, é importante a definição de diretriz para determinação dos valores dos parâmetros de indiferença e preferência.

Referências

ACOLET, T. Modelo de análise de crédito fundamentado no ELECTRE TRI. **Dissertação** de Mestrado Profissionalizante apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração das Faculdades Ibmecc, 2008.

ALMEIDA, A. T. de, **O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão**. 2ª. Edição, Editora Universitária, Recife, 2011.

AZEVEDO, M.C.; COSTA, H.G. Metodologia Multicritério para a Avaliação da Competitividade. **In: XXV ENANPAD**. Campinas, SP, 2001.

BANA e COSTA, C. A., CORTE, J. M., VANSNICK, J. C. **On the mathematical foundations of MACBETH**. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (Ed.). Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. New York: Springer. p. 409-442, 2005.

BRANS, J. P., VINCKE, P. H., MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: the promethee methods. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228-238, 1986.

BUCHANAN, J., GARDINER, L. A Comparison of two reference point methods in multiple objective mathematical programming. **European journal of Operational Research (EJOR)**, 149, pág. 17-34, 2003.

CAMPOS, V.R., ALMEIDA, A.D. de Modelo Multicritério De Decisão para Localização de Nova Jaguaribara com VIP Analysis, **Pesquisa Operacional**, v.26, n.1, p. 91-107, 2006.

CARVALHO, A.R.L. de. Reservatórios de Regularização de Usinas Hidrelétricas: Contribuição para uma Matriz Energética mais Limpa. **Tese de Doutorado** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, 2015.

CLÍMACO, J.C.N. A critical reflection on optimal decision, **European Journal of Operational Research**, n. 153, p. 506-516, 2004.

COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., MACEIRA, M.E.P., RAUPP, I.P., PINTO, I.O., CUNHA, E.N., VENTURA FILHO, A., NEVES, A.R., ROSSO, J.A., FURTADO, R. Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas – Revisão do Manual. **In: X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão do Sistema Elétrico**, 2006.

COSTA, F.S., DAMAZIO, J.M., RAUPP, I.P., PIRES, S.H.M., MATOS, D.F., PAZ, L.R.L., MOLLICA, A., MENEZES, P.C.P. Hydropower inventory studies of river basins in Brazil. **International Journal on Hydropower & Dams**, v. 2/2011, p. 31-36, 2011.

DIAS, L.C., CLIMACO, J.N. Additive Aggregation with Variable Interdependent Parameters: the VIP Analysis Software. **Journal of Operational Research Society** 51, p. 1070-1082, 2000.

ELETRONORTE. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas**. Rio de Janeiro, Brasil, 400p, 1997.

ELETRONORTE/ELETRONORTE/CCORREIA/Odebrecht. **Atualização do Inventário Hidroelétrico da bacia Hidrográfica do rio Xingú**. Rio de Janeiro, 2007.

ELETRONORTE/CNEC/CCORREIA. **Inventário Hidrelétrico dos Rios Tapajós e Jamanxim – Relatório Final**. Brasília, 2008

EPE/CNEC. **Relatório da Revisão dos Estudos de Inventário Hidroelétrico e AAI da bacia do rio Tibagi**. Rio de Janeiro, 2010.

FREITAS, A.L.P., PEIXOTO, F.S., SUETT, W.B. Seleção de Equipamentos: Uma Análise Decisória Utilizando os Métodos Electre III-IV. **In: XXXVI SBPO**, Minas Gerais, 2004.

HUGANNARD, J., ROY, B. Le Plan d'Extension du Metro em benlieue parisienne, um cas type d'application multicritère. **Les Cahiers Scientifiques de la Revue Tansports**, 6:77-108, 1982.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**, Cambridge: Cambridge University Press, p. 569, 1993.

MATOS, D.F., COSTA, F.S., RAUPP, I.P., PAZ, L.R., MEDEIROS, A.M., DAMÁZIO, J.M., SANTOS,

G., GARCIA, K.C. Proposta de Consideração do Impacto Socioambiental do Não-Aproveitamento de Potenciais Hidrelétricos Economicamente Atrativos em Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas. **In:** Anais do XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Brasília-DF, 2013.

MME. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas**. Rio de Janeiro: E-papers, 700p, 2007.

OLSON, D.L., 2001, “Comparison of three multicriteria methods to predict known outcomes”, **European Journal of Operational Research**, n. 130, p. 576-587.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of electre methods. **Theory and Decision**, v. 31, p. 49-73, 1991.

SAATY, T.L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.

VALLÉE, D., ZIELNIEWICZ, P. **ELECTRE III-IV +, version 3.x, Aspects Méthodologiques (tome1). Guide d’utilisation (tome2)**. Document du LAMSADE 85 et 85 bis, Université Paris Dauphine, 1994.

ZONENSEIN, J. Índice de Risco de Cheia como Ferramenta de Gestão de Enchentes, **Dissertação de Mestrado** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2007.

SELECTION OF THE RESERVOIRS AND HYDROELECTRIC PLANTS LOCATION IN HYDROGRAPHIC BASINS CONSIDERING INDIFFERENCE AND PREFERENCE PARAMETERS

Abstract

The locational arrangement of hydroelectric power plants to be built in a river basin is defined by its Hydroelectric Inventory Study. This article presents the evolutions for the inclusion of the socioenvironmental variable in the Inventory Studies and proposes improvements in order to: (i) explain that the non-exploration of the entire hydroelectric potential of the basin can lead to the need of using other sources for the generation that impacts the environmental and (ii) altering the multicriteria decision-making process in the selection of the best alternative with the intention of avoiding the need to define weights for each criterion. The article also presents four case examples to verify the applicability of these proposals.

Key-words: *Multicriteria Analysis, Hydroelectric Inventory Study, Socioenvironmental Impacts, Hydroelectric.*