



NOVA ABORDAGEM PARA A ANÁLISE MULTIOBJETIVO FINAL DOS ESTUDOS
DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Igor Pinheiro Raupp

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez
Fernanda da Serra Costa

Rio de Janeiro
Novembro de 2019

NOVA ABORDAGEM PARA A ANÁLISE MULTIOBJETIVO FINAL DOS ESTUDOS
DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Igor Pinheiro Raupp

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez
Fernanda da Serra Costa

Aprovada por: Prof. Marcelo Gomes Miguez
Prof^ª. Fernanda da Serra Costa
Prof. José Paulo Soares de Azevedo
Prof. João Carlos Namorado Clímaco
Prof. Marco Aurélio dos Santos
Prof. Jorge Machado Damázio
Dr^ª. Angela Regina Livino de Carvalho

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO DE 2019

Raupp, Igor Pinheiro

Nova Abordagem para a Análise Multiobjetivo Final dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas / Igor Pinheiro Raupp. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XV, 163 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

Fernanda da Serra Costa

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 150-159.

1. Inventário Hidrelétrico. 2. Impactos socioambientais. 3. Métodos multicritério. 4. Usinas hidrelétricas. I. Miguez, Marcelo Gomes *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Dedico esta tese a todos aqueles que
diretamente ou indiretamente participaram e
contribuíram para que este momento se
concretizasse.*

*“Queremos saber
o que vão fazer
com as novas invenções...
... Queremos viver
confiantes no futuro...
Pois se foi permitido ao homem
tantas coisas conhecer
é melhor que todos saibam
o que pode acontecer
queremos saber
todos queremos saber...”*

Gilberto Gil

AGRADECIMENTOS

Sempre tive um pouco de dificuldade em achar as palavras certas para expressar todo o meu agradecimento e reconhecimento por aquelas pessoas que contribuíram de alguma maneira para que momentos importantes na minha vida se concretizassem, como é este momento agora. Em grande parte das ocasiões, palavras são poucas para exprimir tudo o que eu gostaria. Então, esta é uma tentativa de expressar em palavras meu mais profundo agradecimento.

Gostaria de começar pelos meus familiares, representados pelos meus pais, João Carlos e Wilma, por tudo o que fizeram por mim até hoje, me permitindo chegar até aqui. Em especial a luta para conseguir me proporcionar uma boa educação, o que me permitiu me graduar e pós graduar em uma excelente universidade pública. Fizeram o mesmo pela minha querida irmã, Tathyana, a quem agradeço por estar sempre ao meu lado.

À minha esposa, Mariana, pelo companheirismo e pela disponibilidade de me reenergizar quando preciso para conseguir me reerguer e prosseguir, principalmente nesta reta final, entendendo as minhas ausências.

Ao CEPEL não só por ter me permitido o desenvolvimento do doutorado como parte das minhas funções, mas por todo o conhecimento adquirido e a oportunidade de conhecer profundamente as metodologias dos Estudos de Inventário e participar de momentos relevantes como a última revisão do Manual de Inventário, bem como de projetos que culminaram nesta tese, como os projetos SINV, IAREF e UHPLAT.

Além disso, o CEPEL me permitiu conhecer pessoas incríveis e que espero que sempre façam parte da minha vida. Em especial, Fernanda da Serra Costa, com quem venho aprendendo desde 2004 e por quem tenho profunda admiração. Obrigado por todos os ensinamentos, atenção, empenho e disponibilidade, não só durante a orientação desta tese, mas ao longo de toda a minha vida profissional. Meu obrigado extensivo a outros grandes e importantes profissionais do CEPEL que admiro e respeito e me auxiliam sempre com ensinamentos e questionamentos, palavras e momentos únicos, Jorge Machado Damázio e a todos da equipe do SINV, do CHEIAS e do meio ambiente e da ASEC, muitos dos quais se tornaram grandes amigos pessoais e com os quais tenho grande prazer em trabalhar e dedicar meu tempo livre fora do CEPEL. Não poderia deixar de citar a colega de trabalho e amiga

Thatiana Justino pelas trocas de problemas relacionados às nossas respectivas teses e ao tema multicritério, comum a ambas.

Ao meu orientador e amigo, Marcelo Gomes Miguez, que me acompanha desde a graduação, por toda a atenção e confiança e por ter aceito ser meu orientador no doutorado.

Ao professor Clímaco por todo estimado e imprescindível conhecimento generosamente compartilhado sobre o tema multicritério. Com paciência e extrema disponibilidade me ajudou a explorar este novo assunto, pelo qual venho desenvolvendo profundo apreço.

Aos professores da COPPE/UFRJ por todo o conhecimento transmitido.

E por último, mas não menos importantes, aos meus queridos amigos de dentro e de fora da Ilha do Fundão, por entenderem minhas ausências, por todo o estímulo e momentos únicos de descontração que me permitiram ter leveza, paciência, sanidade e força de vontade para chegar até aqui. Em especial aos grupos dos quais faço parte que me ajudam a desopilar e tenho a honra de dividir com queridos amigos: o coral do Cepel, o grupo vocal Dá o tom, o Bangalafumenga, e os mais recentes mas não menos importantes Zazumba e Cantareiros.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

NOVA ABORDAGEM PARA A ANÁLISE MULTIOBJETIVO FINAL DOS ESTUDOS DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Igor Pinheiro Raupp

Novembro/2019

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez
Fernanda da Serra Costa

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho propõe uma nova abordagem para a tomada de decisão final dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas para selecionar a melhor alternativa de exploração do potencial hidrelétrico da bacia. Esta nova abordagem quantifica e incorpora novos critérios necessários para que seja possível explorar o potencial hidrelétrico ainda disponível no Brasil: o impacto socioambiental negativo fora da bacia e o benefício ambiental devido a implantação de usinas hidrelétricas com um viés mais sustentável. Também é proposta a alteração do atual método multicritério de seleção da melhor alternativa (soma ponderada), buscando diminuir a dificuldade de definição das informações requeridas. Identificou-se três métodos promissores: VIP Analysis, ELECTRE III e ELECTRE IV. Uma aplicação em um estudo de caso é realizada considerando os dois novos critérios e os três métodos multicritério propostos. Ao final é feita ainda uma discussão para escolha do método multicritério mais apropriado para os estudos finais dos Estudos de Inventário, levando em consideração a opinião dos especialistas/decisores.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

NEW APPROACH TO THE FINAL MULTIOBJECTIVE ANALYSIS OF THE
HYDROPOWER INVENTORY STUDIES OF RIVER BASIN

Igor Pinheiro Raupp

November/2019

Advisors: Marcelo Gomes Miguez
Fernanda da Serra Costa

Department: Civil Engineering

This thesis proposes a new approach for the final decision making of the River Basin Hydropower Inventory Studies to select the best alternative to explore the hydropower potential of the basin. This new approach quantifies and incorporates new criteria needed to exploit the hydropower potential still available in Brazil: the negative socio-environmental impact outside the basin and the environmental benefit due to the implementation of hydropower plants with a more sustainable bias. This new approach also proposes to change the current multicriteria method to select the best alternative (weighted sum), seeking to reduce the difficulty of defining the information required by the method. Three promising methods are proposed: VIP Analysis, ELECTRE III and ELECTRE IV. An application in a case study is performed considering the two new criteria and the three proposed multicriteria methods. At the end there is a discussion concerning the selection of the most appropriate multicriteria method for the final studies of Inventory Studies, taking into consideration the opinion of specialists/decision makers.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	3
2. ESTUDO DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	7
2.1. Contextualização.....	7
2.2. Evolução dos Procedimentos dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas	9
2.3. Análise Multiobjetivo dos Estudos de Inventário.....	13
2.3.1. Análise Multiobjetivo Preliminar	15
2.3.2. Análise Multiobjetivo Final.....	16
3. PROPOSTA DE INCLUSÃO DE NOVOS CRITÉRIOS NA ANÁLISE MULTIOBJETIVO FINAL	20
3.1. Critério 1: Impacto Socioambiental Negativo fora da Bacia.....	21
3.2. Critério 2: Benefício Ambiental na Bacia.....	30
3.2.1. Proposta para o cálculo do Benefício Ambiental	31
3.2.2. Proposta de metodologia para incorporação do Benefício Ambiental na tomada de decisão final dos Estudos de Inventário.....	40
4. PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO NA ANÁLISE MULTIOBJETIVO FINAL.....	44
4.1. Métodos multicritério de apoio à decisão	44
4.2. Propostas de uma nova abordagem multiobjetivo final.....	58
5. ESTUDO DE CASO: BACIA DO MEDIO TOCANTINS.....	67
5.1. Caso referência: Metodologia Manual de Inventário 2007.....	68
5.2. Cálculo do Impacto Socioambiental Negativo Modificado (IAN*).....	73
5.3. Cálculo do Benefício Ambiental.....	75
5.3.1. Definição da área protegida criada pelos projetos hidrelétricos.....	75
5.3.2. Cálculo do Índice de Benefício Ambiental.....	79
5.4. Abordagem 1: Soma ponderada (ICB, IAN* e IAP*).....	81
5.4.1. Aplicação.....	81

5.4.2.	Resultados.....	83
5.5.	Abordagem 2: Método VIP Analysis (ICB, IAN* e IAP*).....	86
5.5.1.	Aplicação.....	86
5.5.2.	Resultados.....	88
5.5.3.	Caso representativo.....	94
5.5.4.	Conclusões.....	94
5.6.	Abordagem 3: ELECTRE III (ICB, IAN* e IAP*).....	96
5.6.1.	Aplicação.....	96
5.6.2.	Resultados.....	98
5.6.3.	Caso representativo.....	110
5.6.4.	Conclusões.....	111
5.7.	Abordagem 4: ELECTRE IV (ICB, IAN* e IAP*).....	113
5.7.1.	Aplicação.....	113
5.7.2.	Resultados.....	115
5.7.3.	Caso representativo.....	117
5.7.4.	Conclusões.....	118
5.8.	Conclusões das Aplicações.....	119
6.	OPINIÃO DE ESPECIALISTAS / DECISORES.....	123
7.	ANÁLISE FINAL DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIO.....	136
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	141
9.	BIBLIOGRAFIA.....	150
	ANEXO 1: QUESTIONÁRIO PRELIMINAR.....	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Processo de decisão multicritério.....	5
Figura 2: Etapas de Implantação de uma usina hidrelétrica.	7
Figura 3: Critérios da tomada de decisão ao longo do tempo.	11
Figura 4: Curva exponencial.....	35
Figura 5: Mapa de Áreas Prioritárias.....	37
Figura 6: Fluxo de processamento dos modelos de critério único de síntese.....	46
Figura 7: Tipos de critérios.....	50
Figura 8: Métodos multicritério frente à compensação e sustentabilidade.	53
Figura 9: Topologia da bacia.	68
Figura 10: Perfil longitudinal do rio, ilustrando os três primeiros projetos mais a jusante..	70
Figura 11: Bacia do Médio Tocantins.	71
Figura 12: Exemplos de áreas protegidas criadas.....	77
Figura 13: Ordenação das alternativas (casos 1A a 1J).....	85
Figura 14: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos 2A a 2J e 2U a 2V). 89	
Figura 15: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos 2V e 2X).....	92
Figura 16: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos 2K a 2T).	93
Figura 17: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos representativos).	94
Figura 18: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3A a 3F).	99
Figura 19: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3G ao 3L).	99
Figura 20: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3N a 3P).	101
Figura 21: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3Q a 3S).	102
Figura 22: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3T a 3V).	103
Figura 23: Desempenho das alternativas 7B e 3R (casos 3U e 3V).	104
Figura 24: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3AA a 3AH).	105
Figura 25: Ordenação das alternativas segundo ELECTRE III (caso 3AI).....	106
Figura 26: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3N e 3AJ).	109
Figura 27: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3AJ a 3AO).	110
Figura 28: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos representativos). ..	111
Figura 29: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE IV (casos 4A a 4F).	115

Figura 30: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE IV (casos 4G a 4P).	115
Figura 31: Ordenação dos casos representativos do ELECTRE IV (casos representativos).	118
Figura 32: Ordenação das alternativas frente aos critérios.	120
Figura 33: Ordenação das alternativas dos casos representativos de cada método.	120
Figura 34: Ordenações considerando o resultado mais próximo do obtido pela soma ponderada.....	122
Figura 35: Pergunta 1 do questionário completo.	129
Figura 36: Respostas da pergunta 1 do questionário completo.	130
Figura 37: Pergunta 2 do questionário completo.	131
Figura 38: Respostas da pergunta 2 do questionário completo.	131
Figura 39: Pergunta 3 do questionário completo.	133
Figura 40: Respostas da pergunta 3 do questionário completo.	133
Figura 41: Pergunta 1 do questionário preliminar.	160
Figura 42: Pergunta 2 do questionário preliminar.	160
Figura 43: Continuação da Pergunta 2 do questionário preliminar, para identificação automática da alternativa vencedora segundo os pesos informados na Pergunta 1.....	161
Figura 44: Pergunta 3 do questionário preliminar.	161
Figura 45: Continuação da Pergunta 3 do questionário preliminar, com o objetivo de explicar os critérios IAN* e IAP*.	162
Figura 46: Pergunta 4 do questionário preliminar.	162
Figura 47: Última pergunta do questionário preliminar.	163

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Desempenho das alternativas.....	71
Tabela 2: Ordenação das alternativas.	72
Tabela 3: Valor do critério IAN* por alternativa.	73
Tabela 4: Resultado referente ao Inventário da bacia do rio Xingú.	74
Tabela 5: Resultado referente ao Inventário da bacia do rio Tibagi.....	74
Tabela 6: Áreas a serem protegidas por projeto e por alternativa.	78
Tabela 7: Valores para cálculo do Benefício Ambiental da alternativa 7A.	80
Tabela 8: Desempenho das alternativas para o Benefício Ambiental.	80
Tabela 9: Desempenho das alternativas.....	81
Tabela 10: Desempenho da alternativa AA.....	83
Tabela 11: Casos considerados.....	83
Tabela 12: Valor do Índice de Preferência Modificado das alternativas para o caso referência e para os dez casos considerados.....	84
Tabela 13: Intervalo dos pesos.	87
Tabela 14: Resumo dos resultados do VIP para o caso 2A.....	90
Tabela 15: Matriz de confrontação dos casos 2D e 2E.....	91
Tabela 16: Resumo dos resultados do VIP para os casos 2D e 2E.....	91
Tabela 17: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3A a 3L).	97
Tabela 18: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3N a 3P).	100
Tabela 19: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3Q a 3S).	102
Tabela 20: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3T a 3V).	103
Tabela 21: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3AA a 3AH).	105
Tabela 22: Informações para cada critério (caso 3AJ).	107
Tabela 23: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3AJ a 3AO).	109
Tabela 24: Dados para execução do ELECTRE IV (casos 4A a 4P).	114
Tabela 25: Dados para execução do ELECTRE IV (caso 4Q).....	117
Tabela 26: Média e desvio-padrão dos pesos relativos da primeira abordagem.	126
Tabela 27: Média e desvio-padrão dos pesos relativos da segunda abordagem.....	126
Tabela 28: Média e desvio-padrão dos pesos relativos da terceira abordagem.....	127

1. INTRODUÇÃO

A matriz de energia elétrica brasileira baseia-se fortemente na exploração do potencial hidroelétrico de suas bacias hidrográficas, representando cerca de 65% da capacidade instalada brasileira (ANEEL, 2019), o que possibilita gerar energia elétrica utilizando uma fonte abundante, limpa, renovável e de baixo custo.

Segundo dados do SIPOT (ELETROBRAS, 2019) e do Banco de Informações da Geração (ANEEL, 2019), o potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em cerca de 250.000 MW, e hoje, com 44% do seu potencial já explorado, conta com mais de 200 usinas hidrelétricas em operação, com capacidade superior a 30 MW.

O planejamento do Setor Energético Nacional é entendido como uma atividade voltada para definir a expansão do sistema produtor/gerador, do sistema de transporte e de armazenamento de energia (nas hidrelétricas e nos estoques de combustíveis). Nesse processo, ajusta-se a oferta à demanda prevista ao longo do horizonte temporal analisado, considerando-se as opções das fontes energéticas nacionais e a importação/exportação de energia e de energéticos. Esta atividade, em geral, contempla diversos tipos de estudos, com objetivos e horizontes temporais distintos, conforme o enfoque a ser priorizado (MME, 2007). Este Planejamento é consolidado em dois planos: Plano Nacional de Energia e o Plano Decenal de Expansão de Energia.

O Plano Nacional de Energia tem caráter mais estratégico, com horizonte de 30 anos, e tem como um de seus objetivos fornecer subsídios para a formulação de uma estratégia de expansão da oferta de energia econômica e sustentável com vistas ao atendimento da evolução da demanda, segundo uma perspectiva de longo prazo (EPE, 2007). Serve, portanto, para antecipar tendências que geram oportunidades e trazem ameaças, as quais necessitam de um posicionamento estratégico no longo prazo e de planos de ação no curto prazo (EPE/MME, 2015). Um dos desdobramentos dos Estudos de Longo Prazo é a indicação de bacias hidrográficas prioritárias para a elaboração de seus Estudos de Inventário.

O Plano Decenal de Expansão de Energia, com horizonte de até 10 anos, segue as diretrizes do Plano Nacional de Energia e apresenta sinalizações para orientar as ações e decisões voltadas para o equilíbrio entre as projeções de crescimento econômico do país e a necessária expansão da oferta, de forma a garantir à sociedade o suprimento energético com adequados custos, em bases técnica e ambientalmente sustentável (MME/EPE, 2018). As decisões são relativas à definição dos empreendimentos que entrarão em operação dentro do horizonte de estudo e sua alocação temporal. Um dos insumos do Plano Decenal são os aproveitamentos hidrelétricos que já possuem viabilidade, oriundos de bacias hidrográficas já inventariadas, que, caso sejam indicados pelo Plano Decenal para serem desenvolvidos nos próximos dez anos, deverão ser direcionados para a fase seguinte de implantação, o Projeto Básico.

A expansão da geração de energia lida com um permanente paradoxo da sociedade, que, por um lado, deseja mais energia para o desenvolvimento e conforto e por outro, questiona suas formas de produção, principalmente no que diz respeito as interferências no ambiente e aos potenciais outros usos dos recursos naturais. O planejamento bem elaborado, a transparência e a democratização dos processos de decisão são os únicos mecanismos capazes de promover as soluções destes conflitos (MME, 2007).

Neste sentido, a etapa de Inventário Hidrelétrico assume um papel importante. Estando no início do processo de tomada de decisão do planejamento da expansão, possui caráter estratégico, pois, neste momento, ainda não foram comprometidos recursos técnicos e financeiros com a implantação das futuras usinas hidrelétricas que irão compor a cascata da bacia hidrográfica em estudo e definirão o potencial a ser explorado na bacia. Portanto, este é o momento em que todas as opções de divisão de quedas para a bacia devem ser estudadas para selecionar aquela que apresente a melhor eficiência em termos energéticos e socioambientais. Além de ser a oportunidade para avaliar as sinergias e efeitos cumulativos entre benefícios e impactos dos diferentes projetos e a possibilidade de articulação com o planejamento de outros setores atuantes na bacia.

Conforme será detalhado no capítulo 2, os Estudos de Inventário passaram por diversas atualizações ao longo do tempo, principalmente, no que se refere à tomada de decisão quanto à escolha da melhor alternativa de divisão de quedas. Até o final da década

de 90, considerava-se apenas um único critério de maximização da eficiência econômico energética. Com o tempo, a questão socioambiental se tornou relevante no Brasil e no mundo, passando a fazer parte da tomada de decisão dos Estudos de Inventário, num primeiro momento, através da minimização dos impactos socioambientais negativos (ELETROBRAS, 1997), e num segundo momento, considerando, também, os impactos socioambientais positivos, relacionados a aspectos socioeconômicos (MME, 2007).

Posteriormente, um estudo desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (CEPEL, 2012; MATOS et al., 2013 e RAUPP et al., 2015) mostrou a importância de se considerar o impacto socioambiental negativo fora da bacia, referente a produção de energia que deixou de ser gerada na bacia, definida como complementação energética de cada alternativa de divisão de quedas, indicando a necessidade de inclusão de um novo critério na tomada de decisão (a ser detalhado no item 3.1).

Mais recentemente, no âmbito do projeto UHPLAT (CEPEL, 2016; COSTA et al., 2017a e COSTA et al, 2017b)¹, identificou-se que usinas hidrelétricas a serem construídas em áreas com características ambientais relevantes deveriam ter cuidados especiais, traduzidos em ações, associadas a conservação ambiental permanente, durante todas as etapas de implantação da usina hidrelétrica e também durante sua operação. Na etapa de Inventário, este projeto indicou a pertinência de se considerar outro critério na análise multiobjetivo final dos Estudos de Inventário, o benefício ambiental na bacia, associado a este novo papel de atuação da usina, como vetor de conservação ambiental permanente. A quantificação deste novo critério é um dos objetivos desta tese, a ser detalhado no item 3.2.

1.1. Objetivo

De acordo com o Manual de Inventário (MME, 2007), a análise multiobjetivo² final dos Estudos de Inventário considera três critérios, cada um com um objetivo específico.

¹ Projeto desenvolvido pelo CEPEL por demanda do Ministério de Minas e Energia, com o objetivo de elaborar uma metodologia para planejar, projetar, construir e operar aproveitamentos hidrelétricos situados em espaços territoriais legalmente protegidos, ou aptos a receberem proteção formal e em áreas com baixa ou nenhuma ação antrópica, de modo que sua implantação se constitua em um vetor de conservação ambiental permanente.

² Salienta-se que a tomada de decisão dos Estudos de Inventário refere-se à uma análise multicritério, porém, o termo multiobjetivo está sendo utilizado nesta tese por referência ao Manual de Inventário, que denomina como “análise multiobjetivo final” a etapa de seleção final da melhor alternativa.

Para selecionar a melhor alternativa, os critérios são agregados em um único índice usando o método da soma ponderada e a alternativa com o menor valor é selecionada. Assim, a equipe multidisciplinar que conduz o Estudo deve definir pesos específicos para cada critério, refletindo a opinião da sociedade. A escolha dos pesos é uma tarefa subjetiva, pois é difícil quantificar as preferências dos tomadores de decisão, estas preferências podem mudar ao longo do processo de tomada de decisão e, em uma decisão em grupo, como é o caso dos Estudos de Inventário, as opiniões e preferências podem geralmente divergir.

A metodologia dos Estudos de Inventário não propõe procedimento para tratar a incerteza dos valores atribuídos aos pesos, de forma a levar em conta esta subjetividade. Em tempo, a decisão quanto aos pesos, tem influencia direta na decisão quanto a melhor alternativa. Para contornar esta situação, nos Estudos de Inventário é sugerido fazer uma análise de sensibilidade, porém, variar os pesos em busca da alternativa mais robusta pode não ser a forma mais eficiente, além de não ter nenhuma metodologia formal como base para esta análise.

O objetivo desta tese, então, é a proposição de uma nova abordagem para a análise multiobjetivo dos estudos finais dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de bacias hidrográficas. Este objetivo se desdobra em três objetivos específicos:

- Propor uma metodologia para quantificação do benefício ambiental proveniente da implantação de aproveitamentos hidrelétricos, uma vez que o atual critério impacto socioambiental positivo leva em consideração apenas aspectos socioeconômicos;
- Incorporar na análise multiobjetivo final dos Estudos de Inventário dois novos critérios, de modo que a decisão quanto a melhor alternativa de divisão de quedas considere também: o impacto socioambiental fora da bacia e o benefício ambiental;
- e
- Propor método multicritério de apoio a decisão nos estudos finais do Inventário, alterando o atual método da soma ponderada, de forma a mitigar a dificuldade de definição de pesos específicos para os critérios, mas ainda permitir distinguir a importância entre os critérios.

Conforme descrito por POHEKAR et al. (2003) um processo de decisão multicritério se divide em etapas, esquematizadas na Figura 1. A partir dos objetivos específicos da tese

e considerando o esquema da Figura 1, esta tese vai discutir as etapas destacadas em azul, a saber: Seleção dos critérios e seleção do método de decisão.

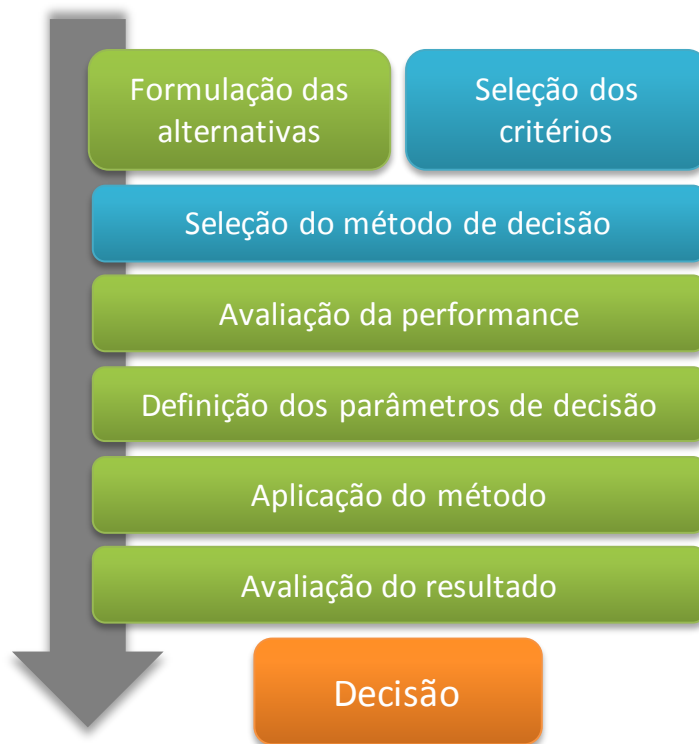


Figura 1: Processo de decisão multicritério.
(elaborado a partir de POHEKAR et al., 2003)

Esta tese está estruturada em nove capítulos, sendo que o capítulo 1 consiste nesta introdução. No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre Estudos de Inventário Hidrelétrico de bacias hidrográficas, incluindo o detalhamento da tomada de decisão destes estudos em vigor na época da publicação desta tese. O capítulo 3 apresenta a proposta de inclusão de dois novos critérios na tomada de decisão final, bem como detalha a proposta de quantificação de um dos novos critérios, ambos objetivos desta tese. O capítulo 4 começa com uma revisão bibliográfica de métodos multicritério culminando na proposição de novos métodos multicritério para a tomada de decisão final, alterando o método atualmente em uso. O capítulo 5 apresenta a aplicação das propostas detalhadas nos capítulos 3 e 4 em um estudo de caso de uma bacia hidrográfica. O capítulo 6 apresenta uma análise do resultado dos questionários que foram aplicados com o objetivo de obter a opinião de especialistas e decisores referente a tomada de decisão final. O capítulo 7 apresenta as conclusões e recomendações e o capítulo 8 as referências bibliográficas. A

tese conta ainda com um anexo, onde é apresentado o questionário preliminar, cujos resultados foram analisados no capítulo 6.

2. ESTUDO DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Neste capítulo serão abordadas as etapas de implantação de uma usina hidrelétrica, com destaque para a etapa de Estudos de Inventário (item 2.1), sua evolução ao longo do tempo com os aprimoramentos na tomada de decisão (item 2.2), incluindo um detalhamento da tomada de decisão em vigor na época de elaboração desta tese (item 2.3). Como parte da evolução da tomada de decisão, são apresentados sucintamente os aprimoramentos ainda não contemplados pelo Manual de Inventário e que estão sendo propostos nesta tese como uma parte da referida nova abordagem multiobjetivo. Ressalta-se que estes aprimoramentos propostos serão detalhados no capítulo 3.

2.1. Contextualização

O ciclo de implantação de uma usina hidrelétrica compreende as etapas esquematizadas na Figura 2, cada uma associada a um conjunto de estudos e procedimentos com abrangência e detalhamentos diferentes e que visam disponibilizar as informações necessárias para as tomadas de decisão associadas a cada uma das etapas (CEPEL, 2016).

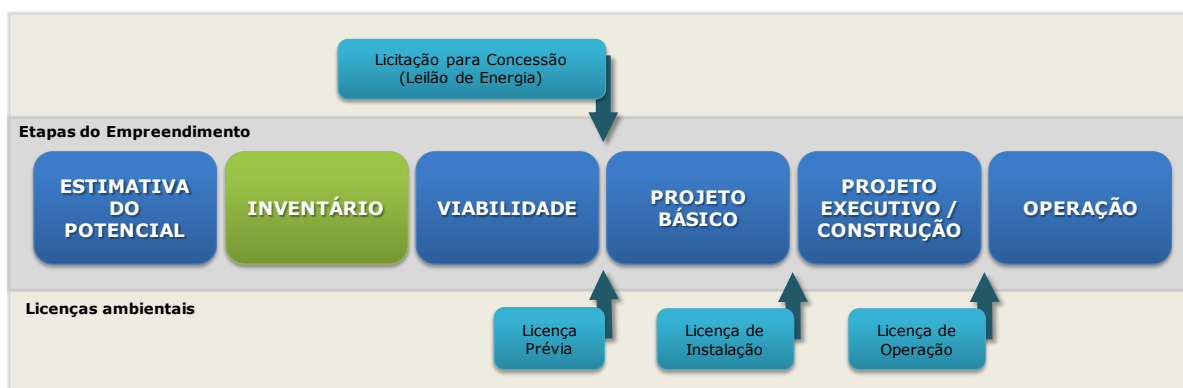


Figura 2: Etapas de Implantação de uma usina hidrelétrica.

A primeira etapa, conhecida como **Estimativa do Potencial Hidrelétrico**, compreende uma análise preliminar da bacia hidrográfica, a partir de dados disponíveis, para estimativa de seu potencial hidrelétrico e custo estimado para seu desenvolvimento, com o intuito de verificar sua vocação para geração de energia elétrica.

A fase seguinte, o **Inventário Hidroelétrico**, se caracteriza pela concepção e análise de várias alternativas de divisão de quedas para a bacia hidrográfica, formadas por um conjunto de projetos, que são comparadas entre si, visando selecionar aquela que apresente melhor equilíbrio entre os custos de implantação, benefícios energéticos e impactos socioambientais. Essa análise é efetuada com base em dados secundários, complementados com informações de campo, e pautado em estudos básicos cartográficos, hidrometeorológicos, energéticos, geológicos e geotécnicos, socioambientais e de usos múltiplos de água. Dessa análise resultará um conjunto de aproveitamentos, suas principais características, índices custo/benefício e índices socioambientais. Faz parte dos Estudos de Inventário submeter os aproveitamentos da alternativa selecionada a um estudo de Avaliação Ambiental Integrada visando subsidiar os processos de licenciamento. Estes aproveitamentos passam então a ser incluídos no elenco de aproveitamentos inventariados do País, passíveis de compor os planos de expansão do setor (MME, 2007).

Diferentemente do Inventário Hidrelétrico, que considera a bacia como um todo, o intuito dos **Estudos de Viabilidade** é estudar em separado os aproveitamentos hidrelétricos provenientes da alternativa de divisão de quedas vencedora do Estudo de Inventário, de modo a efetuar estudos mais detalhados objetivando sua otimização técnica, econômica e socioambiental, definindo o aproveitamento ótimo que irá ao leilão de energia.

No leilão de energia, o empreendimento passa a ter um “dono” (empreendedor) que conduzirá as etapas subsequentes, começando pelo **Projeto Básico**, onde é feito o detalhamento do estudo de viabilidade do aproveitamento hidrelétrico, e, posteriormente, a etapa referente ao **Projeto Executivo**, onde se realiza o detalhamento dos estudos desenvolvidos no projeto básico, visando à implantação do empreendimento, incluindo medidas pertinentes à formação do reservatório. Esta etapa está diretamente associada à construção do empreendimento (CEPEL, 2016). Finalizada a construção, dá-se início ao enchimento do reservatório e posterior operação da usina hidrelétrica.

2.2. Evolução dos Procedimentos dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas

A primeira metodologia de planejamento para sistemas hidrelétricos e dimensionamento das usinas, no Brasil, foi desenvolvida na década de 60 pelo projeto CANAMBRA (Consórcio Canadense, Americano e Brasileiro) (CANAMBRA, 1963). Este mesmo projeto realizou um extenso levantamento do potencial hidrelétrico das regiões sudeste e sul do país e desenvolveu o primeiro plano de expansão de longo prazo estruturado no país.

Segundo este projeto, o Brasil apresenta algumas características peculiares, que exigem um adequado planejamento da expansão da geração elétrica: (i) organização institucional complexa, em função das suas dimensões, das diferenças regionais e da necessidade de participação dos diferentes agentes públicos e privados; (ii) sistema predominantemente hidrelétrico, com grandes reservatórios de regularização plurianual; (iii) possibilidades de conexões inter-regionais com aproveitamento da diversidade hidrológica entre bacias, dentre outros (CUNHA et al, 2006).

Nesta época, a Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.), subordinada ao Ministério de Minas e Energia (MME) era a responsável por promover os Estudos de longo, médio e curto prazos, da expansão do sistema elétrico brasileiro. Portanto, a Eletrobras foi a responsável pela publicação, em 1977, da primeira versão do “Manual de Instruções para Estudos de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas para Aproveitamento Hidrelétrico” (ELETROBRAS, 1977). O objetivo deste manual era consolidar os critérios e procedimentos, de forma a serem considerados em todos os Estudos de Inventário, permitindo que estes fossem comparáveis entre si e homogêneos.

Em 1984, a Eletrobras lançou uma revisão do Manual de Inventário (ELETROBRAS, 1984), incorporando avanços, principalmente, na área de pré-dimensionamento dos projetos. Até este momento, a seleção da melhor alternativa de divisão de quedas considerava apenas o critério de eficiência econômico-energética. Os aspectos socioambientais, apesar de serem postulados como critério para avaliação e seleção das alternativas de divisão de quedas, não eram objeto de tratamento formal e sistemático, de forma que pudessem atuar de modo efetivo no processo decisório (CEPEL, 1997).

A terceira versão do Manual de Inventário, editado em novembro de 1997 (ELETROBRAS, 1997), é fruto de uma criteriosa revisão apoiada no Manual de Inventário de 1984 e no Plano Diretor de Meio Ambiente do Setor Elétrico Brasileiro, de 1991. A metodologia de avaliação ambiental foi desenvolvida por um grupo multidisciplinar, coordenado pelo CEPEL, e incorporando o conceito de integração dos estudos de engenharia com os estudos socioambientais. A seleção da melhor alternativa de divisão de quedas passa a considerar um critério multiobjetivo de maximização da eficiência econômica e energética e minimização dos impactos socioambientais negativos. Os custos relativos às ações de prevenção, mitigação e compensação de impactos são internalizados, contribuindo para a incorporação dos aspectos socioambientais como variáveis de decisão desde as etapas iniciais do processo de planejamento da expansão do setor. (ELETROBRAS, 2017)

O Manual de Inventário de 1997 (ELETROBRAS, 1997) foi um avanço, tendo sido um dos primeiros esforços nacional para a incorporação da dimensão ambiental e dos usos múltiplos da água nos estudos energéticos. Entretanto, devido ao seu pioneirismo, muito da legislação referente às questões ambientais e dos usos múltiplos da água ainda não estavam estabelecidas naquela época. Neste período a Lei nº 9.984 de 17/07/2000, criou a Agência Nacional de Águas (ANA), responsável pela execução da Política Nacional de Recursos Hídricos e implantação da Lei nº 9.433 de 08/12/1997, denominada “Lei das Águas”. Durante este período o Setor Elétrico também viveu uma grande reformulação. A Lei nº 9.427 de 26/12/1996 criou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com atribuições de regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica. A Lei nº 10.847 de 15/03/2004 autorizou a criação da Empresa de Pesquisas Energética (EPE), vinculada ao MME, com a competência de, dentre outras, realizar estudos para a determinação dos aproveitamentos ótimos dos potenciais hidráulicos. Outros dois eventos importantes foram a adoção da Avaliação Ambiental Integrada (AAI) como parâmetro de avaliação para os aproveitamentos a serem estudados em algumas bacias hidrográficas do país, conforme Termo de Ajustamento de Conduta firmado entre o Ministério Público e a Agência Goiana de Meio Ambiente e Recursos Naturais em 21/07/2004, e a finalização do Plano Nacional de Recursos Hídricos, aprovado pela Resolução nº 58 de 30/01/2006.

Por conta disso, em 2007 foi lançada uma nova revisão do Manual de Inventário (MME, 2007), sendo a versão em vigor até a elaboração desta tese. Esta revisão foi realizada por demanda do MME, sob a coordenação do CEPEL e com a participação de técnicos do MME, CEPEL, EPE, Ministério de Meio Ambiente (MMA), Eletrobras, FURNAS, Chesf, Eletrosul, Eletronorte, ANA, ANEEL, diversas empresas com experiência em realização de Inventários e representantes de associações de classe. O foco desta revisão foi, em especial, nas questões socioambientais e de usos múltiplos da água, incluindo a Avaliação Ambiental Integrada como mais uma etapa dentro do Estudo de Inventário e a inclusão de mais um critério na Análise Multiobjetivo Final, denominado de Impacto Socioambiental Positivo, associado aos benefícios socioeconômicos para a região devido a implantação dos aproveitamentos hidrelétricos. Nesta revisão foram também atualizados os custos unitários e as planilhas de dimensionamento e custos dos projetos.

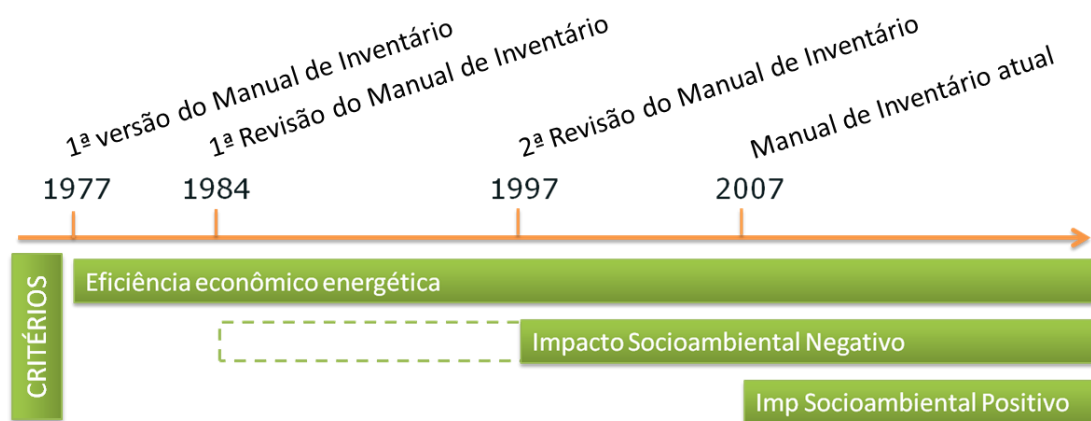


Figura 3: Critérios da tomada de decisão ao longo do tempo.

Apesar do grande esforço para revisão do Manual de Inventário, durante os 10 anos seguintes, foi possível vislumbrar espaço para aprimoramentos, no que tange a análise multiobjetivo de seleção de alternativas, em especial o cálculo do índice de impacto socioambiental negativo (IAN), conforme constatado por CEPEL (2012), MATOS et al. (2013), RAUPP et al. (2015) e CARVALHO (2015). No que diz respeito ao cálculo do índice custo-benefício (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, conforme será detalhado no item 2.3. 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 socioambientais 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, em 2011, o CEPEL iniciou um projeto específico para construção de metodologia para definição do Índice de Impacto Socioambiental Negativo do Não-aproveitamento de Potenciais Hidrelétricos em Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas, denominado IAREF (CEPEL, 2012)(MATOS et al., 2013)(RAUPP et al., 2015), que teve como objetivos:

- 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; e
- Incluir mais um critério na Análise Multiobjetivo dos Estudos de Inventário: o índice de impacto socioambiental negativo relativo ao não-aproveitamento de potenciais hidrelétricos econômico-energeticamente eficientes em Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas, a ser denominado nesta tese de índice de impacto socioambiental negativo fora da bacia;

Em 2013, o MME editou uma Nota Técnica (MME, 2013), com o apoio de diversas entidades do setor elétrico, dentre elas a EPE, as empresas Eletrobras e o CEPEL, de forma a viabilizar a implantação de usinas hidrelétricas em regiões de sensibilidade ambiental relevante, com baixa ou nenhuma ação antrópica, próxima de áreas protegidas tendo como foco a manutenção da diversidade biológica. Com o objetivo de aprofundar o conceito desta nova tipologia de usina (denominada usina-plataforma) e os procedimentos e metodologias que concretizam sua aplicação, em 2014 foi estabelecido o projeto de consultoria entre o MME e o CEPEL com participação da COPPE/UFRJ e consultores

externos para elaboração de metodologia para o desenvolvimento de usinas hidrelétricas sob o conceito de Usinas-Plataforma, com suporte financeiro do Banco Mundial (Projeto META – *Mineral and Energy Technical Assistance Loan*).

Dentre as modificações propostas em CEPEL (2016), COSTA et al. (2017a) e COSTA et al (2017b) associadas a este projeto, referem-se a metodologia dos Estudos de Inventário, principalmente:

- Compatibilização do critério de descarte de projetos nos Estudos de Inventário com o conceito de usina-plataforma; e
- Incorporação de um mais um critério na Análise Multiobjetivo Final associado ao benefício ambiental na bacia, referente ao conceito de vetor de conservação permanente.

A quantificação deste novo critério (benefício ambiental na bacia) é um dos objetivos desta tese.

Tendo em vista o que foi apresentado neste item, constata-se a necessidade de rever a Análise Multiobjetivo dos Estudos de Inventário de maneira a considerar dois novos critérios identificados como relevantes na tomada de decisão quanto a melhor alternativa de divisão de quedas. Estes dois novos critérios serão detalhados no capítulo 3.

2.3. Análise Multiobjetivo dos Estudos de Inventário

Conforme já apresentado, o objetivo do Estudo de Inventário Hidrelétrico é analisar todas as opções de divisão de quedas da bacia e selecionar a melhor de acordo com o critério básico definido como "a maximização da eficiência energética econômico com a minimização dos impactos socioambientais negativos, levando em conta os impactos positivos da implementação de usinas hidrelétricas na bacia" (MME, 2007).

Os Estudos de Inventário podem ser agregados em 5 grupos:

- Estudos de campo: levantamento de dados a serem utilizados nos demais estudos, tais como: topografia, batimetria, etc.;

- Estudos de engenharia: definição do layout e dimensionamento das estruturas (barragem, turbinas, etc.) para estimação dos custos dos projetos, que serão utilizados no cálculo da eficiência econômico-energética, um dos critérios de seleção da melhor alternativa;
- Estudos energéticos: cálculo da energia firme³ dos projetos e das alternativas de divisão de quedas, que também será utilizado no cálculo da eficiência econômico-energética;
- Estudos socioambientais: análise e quantificação dos impactos socioambientais, que serão utilizados nos índices socioambientais negativo e positivo (critérios para seleção da melhor alternativa). Também devem influenciar a elaboração dos projetos e formulações das alternativas de divisão de quedas; e
- Estudos hidrológicos: que incluem a concepção do cenário de usos múltiplos da água.

Os Estudos de Inventário se dividem em duas fases: Estudos Preliminares e Estudos Finais. O objetivo dos Estudos Preliminares é analisar de forma expedita todas as possíveis alternativas de divisão de quedas e identificar as alternativas mais interessantes do ponto de vista de eficiência econômico energética e socioambiental, que passarão para os Estudos Finais. O intuito é reduzir o número de alternativas de divisão de quedas, principalmente em Inventários que possuem muitas alternativas, eliminando as alternativas não competitivas. As alternativas selecionadas na fase de Estudos Preliminares serão estudadas com maior profundidade nos Estudos Finais com o objetivo de selecionar, dentre estas, a melhor alternativa de divisão de quedas, que representará o potencial hidrelétrico da bacia a ser explorado. Desde o Manual de Inventário de 2007, pode-se considerar como uma terceira fase dos Estudos a Avaliação Ambiental Integrada da alternativa selecionada nos Estudos Finais.

A seleção das alternativas, ao final de cada fase dos Estudos, é realizada nas Análises Multiobjetivo Preliminar e Final, que serão detalhadas a seguir, sendo esta última o foco desta tese.

³ Energia média gerada por um projeto ou um conjunto de projetos obtidos por simulação da operação do sistema durante o período mais seco do registro de vazões.

2.3.1. Análise Multiobjetivo Preliminar

A seleção das alternativas nos Estudos Preliminares, que serão examinadas com maior profundidade na fase dos Estudos Finais, é feita considerando os índices **custo-benefício energético** (ICB) e de **impacto socioambiental negativo** (IAN) obtidos para cada uma das alternativas.

O **índice custo-benefício** de uma alternativa de divisão de quedas (ICB_a), em R\$/MWh, é definido pela equação 2.1. A obtenção deste índice visa a hierarquização das alternativas em função do atendimento ao objetivo de maximização da eficiência econômico-energética, através da minimização do valor do índice ICB.

$$ICB_a = \frac{CT_a + 8760 \times CUR \times (\Delta Ef^* - \Delta Ef_a)}{8760 \times \Delta Ef^*} \quad (2.1)$$

Onde:

CUR⁴ - Custo unitário de referência, em R\$/MWh;

ΔEf* - Energia firme da alternativa com maior produção no conjunto das alternativas analisadas, em MW médios;

ΔEf_a - Energia firme da alternativa “a”, em MW médios;

CT_a - Custo total anual da alternativa “a”, em R\$; e

8760 – Conversão de hora para ano.

O **índice de impacto socioambiental negativo** de uma alternativa de divisão de quedas busca expressar a intensidade do impacto negativo sobre a área de estudo do conjunto dos aproveitamentos que a compõem. Para a avaliação e obtenção das intensidades de impacto, considera-se o sistema ambiental representado por seis temas, denominados componentes-síntese, são eles: Ecossistemas Aquáticos, Ecossistemas Terrestres, Modos de Vida, Organização Territorial, Base Econômica e Povos Indígenas. Seu cálculo se desenvolve em três partes:

⁴ Custo Unitário de Referência (CUR) é o custo de geração, em R\$/MWh, acima do qual a contribuição energética das usinas, ou das configurações de usinas, deixa de ser economicamente competitiva. Corresponde ao custo de longo prazo no sistema de referência considerado para a produção de energia a um fator de capacidade Fk, resultante da combinação da fonte de energia e da fonte de ponta do sistema de referência. (MME, 2007).

- Obtenção da intensidade de impacto negativo de cada aproveitamento hidrelétrico para cada componente-síntese;
- Agregação das intensidades de impacto dos aproveitamentos em um índice relativo a alternativa de divisão de queda, para cada componente-síntese;
- Composição do índice de impacto negativo da alternativa sobre o sistema socioambiental (agregação dos seus índices de impacto negativos relativos a todos os componentes-síntese).

A obtenção deste índice visa a hierarquização das alternativas em função do atendimento ao objetivo de minimização dos impactos socioambientais negativos.

Por se tratar da seleção de um conjunto de alternativas, na fase de Estudos Preliminares não é feita a agregação dos dois índices, uma vez que, nesta fase, o importante é evidenciar o posicionamento de cada alternativa com relação a cada um dos objetivos (maximização da eficiência econômico-energética e minimização dos impactos socioambientais negativos), evitando-se, deste modo, a necessidade de se estabelecer a importância relativa entre os objetivos. A seleção é realizada tendo como base a eliminação das alternativas que apresentem baixo desempenho sob o ponto de vista de cada critério isoladamente e a identificação, dentre as alternativas restantes, do conjunto de alternativas não-dominadas (conjunto pareto-ótimo⁵)

2.3.2. Análise Multiobjetivo Final

O objetivo da análise multiobjetivo final, foco desta tese, é selecionar a melhor alternativa de divisão de quedas do Estudo de Inventário, considerando 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.

Esta seleção é realizada através de uma análise multiobjetivo onde a eficiência econômico-energética é representada pelo índice custo-benefício energético (ICB),

⁵ Conjunto de alternativas para as quais não exista outra com índice custo/benefício energético e índice socioambiental negativo, simultaneamente inferiores.

detalhado no item 2.3.1, e os impactos socioambientais negativo e positivo são representados pelos índices de impacto socioambiental negativo (IAN), também detalhado no item 2.3.1, e positivo (IAP).

Apesar de ser denominado índice de impacto socioambiental positivo, para sua quantificação consideram-se apenas aspectos relacionados aos benefícios de desenvolvimento socioeconômico para a região devido a implantação dos aproveitamentos hidrelétricos. De acordo com MME (2007), os benefícios considerados neste índice são:

- Aumento da arrecadação municipal: pagamento de compensação financeira pela exploração dos recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica pelos aproveitamentos hidrelétricos e o Imposto Sobre serviços (ISS) arrecadado pelos municípios em decorrência dos serviços prestados durante as obras;
- Dinamização do mercado de trabalho local: geração de empregos diretos e indiretos em função das atividades econômicas desenvolvidas devido à implantação de um aproveitamento hidrelétrico e intensificação das atividades nos setores de comércio e serviços;
- Melhoria da infraestrutura rodoviária: benfeitorias empreendidas na área da usina e nas conexões com a(s) sede(s) municipal(is) e adjacências, especialmente em termos de estradas de rodagem e pontes, melhorando a acessibilidade e circulação da região;
- Oportunidade de viabilização do uso racional dos recursos hídricos: contribuição da implantação dos aproveitamentos hidrelétricos aos objetivos dos Planos de Bacia, Planos Regionais ou Setoriais já existentes em relação à ampliação da área apta para irrigação, ampliação da extensão de rios navegáveis, controle de cheias, etc.

Na Fase de Estudos Finais, para seleção da melhor alternativa de divisão de quedas, as alternativas são hierarquizadas segundo o **Índice de Preferência (I)**, definido conforme equação (2.2).

$$I_a = p_{cb} \times \frac{ICB_a}{CUR} + p_{an} \times IAN_a \quad (2.2)$$

$$\text{Sendo: } p_{cb} + p_{an} = 1 \quad p_{cb} \geq 0 \quad p_{an} \geq 0 \quad (2.3)$$

Onde:

I_a - índice de preferência da alternativa “a”;

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;

p_{an} - peso que reflete a importância relativa do objetivo “minimização do índice de impacto socioambiental negativo na bacia”; e

IAN_a - índice de impacto socioambiental negativo da alternativa “a”.

A definição dos pesos p_{cb} e p_{an} , referentes a cada um dos critérios, deve considerar a opinião dos especialistas envolvidos diretamente no Estudo de Inventário, buscando refletir o contexto em que a análise se insere e a época em que os estudos se realizam.

A partir do Manual de Inventário de 2007, para a escolha final da melhor alternativa, propõe-se uma análise adicional para incorporação do Impacto Socioambiental Positivo à hierarquia anterior. Calcula-se, então, um novo índice, denominado de **Índice de Preferência Modificado** (I'), conforme a equação (2.4). A alternativa que obtiver o menor valor para este índice será considerada a melhor alternativa de divisão de quedas.

$$I'_a = (1 - p_{ap}) \cdot I_a + p_{ap} (I - IAP_a) \quad (2.4)$$

Sendo: $p_{ap} \geq 0$ (2.5)

Onde:

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

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

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

Como o critério de maximização do impacto socioambiental positivo possui caráter complementar aos demais critérios, o Manual de Inventário sugere que o peso p_{ap} não ultrapasse o valor de 0,25.

Todos os índices referem-se a valores reais entre zero e um, sendo o ICB/CUR e o IAN quanto mais próximos de zero melhor (minimização) e o IAP quanto mais próximo de um melhor (maximização), por isso, no cálculo do I', utiliza-se o complementar do IAP.

Neste item (2.3), foram apresentados os critérios atualmente utilizados na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, a saber: índice custo-benefício (ICB), índice de impacto socioambiental negativo (IAN) e índice de impacto socioambiental positivo (IAP). No próximo capítulo serão abordados os novos critérios propostos nesta tese a serem incluídos na nova abordagem da análise multiobjetivo final dos Estudos de Inventário.

3. PROPOSTA DE INCLUSÃO DE NOVOS CRITÉRIOS NA ANÁLISE MULTIOBJETIVO FINAL

Uma das alterações propostas para a análise multiobjetivo na fase dos estudos finais nos Estudos de Inventário é a incorporação de dois novos critérios, sendo este um dos objetivos específicos desta tese, conforme mencionado na Introdução (item 1.1). Este capítulo detalha os dois novos critérios.

O primeiro critério, a ser detalhado no item 3.1, refere-se à consideração do impacto socioambiental negativo fora da bacia, relativo ao não-aproveitamento de potenciais hidrelétricos economicamente atrativos na bacia. Ressalta-se que a metodologia para sua quantificação e diferentes abordagens de sua incorporação na tomada de decisão foram desenvolvidas pelo CEPEL (CEPEL, 2012),(MATOS et al., 2013),(RAUPP et al., 2015), contando com a participação de uma equipe multidisciplinar. Nesta tese, identificou-se a pertinência de considerar tal critério e, a partir das abordagens sugeridas no referido projeto, será definida uma única metodologia de incorporação.

O segundo critério, a ser detalhado no item 3.2, refere-se ao benefício ambiental na bacia, associado ao conceito de vetor de conservação permanente, em especial, da nova tipologia de usina denominada usina-plataforma, cuja metodologia para sua quantificação e para sua incorporação está sendo proposta nesta tese.

O projeto UHPLAT (CEPEL, 2016) teve como objetivo elaborar uma metodologia para planejar, projetar, construir e operar aproveitamentos hidrelétricos situados em regiões de sensibilidade ambiental relevante, com baixa ou nenhuma ação antrópica, próxima de áreas protegidas, de modo que sua implantação se constitua em um vetor de conservação ambiental permanente (MME, 2013). O projeto identificou que os procedimentos propostos para esta nova tipologia de usina, denominada usina-plataforma, deveriam englobar todas as etapas de implantação dos aproveitamentos hidrelétricos, incluindo a etapa de Inventário, concluindo então, que os benefícios oriundos da ação proativa do empreendimento nas ações de conservação ambiental permanente deveriam ser considerados nos Estudos de Inventário.

Entende-se que estas ações podem ser incorporadas também por aproveitamentos que não se enquadrem perfeitamente na definição de usina-plataforma. Nesta tese, de forma a generalizar, será utilizado o termo “usinas que atuam como vetor de conservação (UHE_VC)”, de tal forma a englobar as usinas-plataforma e demais usinas que optem por esta atuação.

Com relação aos processos de tomada de decisão, é importante ressaltar que a escolha dos critérios é uma etapa importante. De acordo com GEOPOPOULOU et al (1997), um conjunto consistente de critérios, para auxiliar na avaliação adequada das alternativas, devem ser:

- Legíveis: conter um número de critérios suficientemente pequeno de modo a constituir uma base de discussão e permitir procedimentos de agregação dos critérios;
- Operacionais: ser considerado por todos os atores envolvidos como uma base sólida para o estudo de apoio a decisão;
- Exaustivo: conter todos os pontos de vista importantes;
- Monotônico: as preferências parciais modeladas por cada critério devem ser consistentes com as preferências globais expressas nas alternativas; e
- Não-redundante: critérios não podem ter dupla contagem.

Estas características foram levadas em consideração tanto na escolha dos novos critérios, quanto na definição das metodologias de quantificação e incorporação dos mesmos na tomada de decisão, que estão sendo propostas nesta tese.

3.1. Critério 1: Impacto Socioambiental Negativo fora da Bacia

Conforme apresentado no capítulo 2, os Estudos de Inventário caracterizam-se pela concepção, análise e comparação de diferentes alternativas com o objetivo de selecionar aquela que apresente o melhor balanço entre o índice custo-benefício energético (ICB) e os índices de impactos socioambientais negativo e positivo (IAN e IAP).

No que diz respeito ao cálculo do índice custo-benefício energético para realizar a comparação das alternativas é feita uma homogeneização dos benefícios energéticos, por meio da complementação da geração de energia associada às alternativas com menor ganho de energia firme, até o maior valor dentre todos. Esta complementação é valorada pelo custo unitário de referência (CUR). 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, o cálculo do índice de impacto socioambiental negativo não considera as diferenças de geração entre as alternativas de divisão de queda de uma dada bacia hidrográfica, de forma que o impacto socioambiental negativo da geração das complementações energéticas, que se dará em outra bacia hidrográfica ou utilizando outra fonte de geração de energia elétrica, não é contabilizado.

Entretanto, tal impacto pode não ser desprezível, sendo interessante avaliar a relevância de sua inserção no cálculo do índice de impacto socioambiental negativo, de modo a 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 por hidrelétrica em outra bacia hidrográfica, o que pode acarretar impactos socioambientais específicos.

Esta consideração torna-se relevante, uma vez que a alternativa selecionada nos Estudos de Inventário definirá o potencial hidrelétrico a ser explorado na bacia.

Esta necessidade já foi abordada por diversos autores. DAMAZIO et al. (1997) considerou a complementação energética como um critério adicional além do índice custo-benefício e do impacto socioambiental negativo. De acordo com os autores, considerou-se o impacto socioambiental negativo associado ao meio ambiente da região estudada e o critério adicional associado à preocupação com o meio ambiente externo, sendo quantificado pela energia a ser complementada, de modo que, quanto maior a energia a ser complementada, maior é a insatisfação ou impacto externo. CARVALHO (2015) propôs duas alternativas de metodologias simplificadas, ambas através da inclusão de mais componentes-síntese para avaliar o impacto proveniente da energia complementar, que

seria representada por 50% de carvão mineral e 50% de energia nuclear. A primeira opção foi calcular o impacto da complementação considerando quatro componentes-síntese (base econômica, mudança climática, conforto da população e pressão da infraestrutura), sendo o impacto total da alternativa a média dos dois impactos (dentro e fora da bacia). A segunda opção foi incluir o componente-síntese emissão de CO₂ no cálculo do próprio IAN já existente. Para ambas as metodologias, CARVALHO apresentou um exemplo que alterava a ordenação das alternativas em termos de impacto, influenciando a tomada de decisão. Ao final, CARVALHO propõe a utilização da metodologia proposta pelo CEPEL (2012).

A metodologia desenvolvida pelo CEPEL, no projeto IAREF (CEPEL, 2012), (MATOS et al., 2013), (RAUPP et al., 2015), seguiu um caminho diferente, pois considerou que o impacto socioambiental negativo fora da bacia relaciona-se ao montante de energia que deixa de ser gerado na bacia em estudo por cada alternativa de divisão de quedas (complementação energética), imaginando que esta energia será necessária para atender a demanda futura e, portanto, estará prevista no planejamento de longo prazo da expansão da geração do setor. Assim, a metodologia para sua quantificação e incorporação consistiu em valorar o impacto negativo deste montante de energia firme (complementação energética) pelo índice representativo do impacto socioambiental negativo da expansão da geração (IAEXP). Como a complementação energética de cada alternativa é diferente, o índice de impacto socioambiental negativo da energia firme complementar de cada alternativa de divisão de quedas, denominado IACE, será proporcional ao IAEXP.

Durante os estudos desenvolvidos no âmbito do projeto IAREF, para fins de cálculo do IAEXP, considerou-se o Plano que estava disponível naquele momento, o Plano Nacional de Energia (PNE), mais especificamente, o PNE 2030 (EPE/MME, 2007).

Pode-se fazer um paralelo entre o CUR, utilizado no cálculo do ICB para quantificar a complementação energética das alternativas, e o IAEXP, que será utilizado no cálculo do IACE para quantificar o impacto socioambiental negativo da complementação energética de cada alternativa. Assim, uma questão-chave para o Projeto IAREF foi calcular o IAEXP, índice representativo do impacto socioambiental fora da bacia da expansão da geração. De acordo com CEPEL (2012), o desenvolvimento da metodologia de cálculo deste índice (IAEXP) se dividiu em três etapas:

1. Seleção dos principais impactos socioambientais das diversas fontes de geração de energia a serem considerados no IAEXP;
2. Seleção dos indicadores destes impactos e posterior quantificação; e
3. Agregação dos diversos impactos em um único índice (IAEXP) e cálculo do índice por alternativa (IACE).

Após estas três etapas, foram definidas três abordagens de incorporação do IACE na Análise Multiobjetivo Final dos Estudos de Inventário.

A etapa de seleção dos principais impactos das diversas fontes de geração teve como objetivo selecionar os impactos socioambientais negativos mais significativos identificados por fonte de geração de energia elétrica, considerando todas as etapas do seu ciclo de vida, para serem contemplados na construção do IAEXP. Como ponto de partida foi considerada uma lista inicial contemplando todos os impactos por fonte de energia encontrados em publicações de referência e, por ser uma lista bastante extensa, foram realizadas quatro filtragens, usando diferentes critérios de exclusão, para seleção dos principais impactos.

Ao final, os principais impactos totalizaram 17 impactos, porém, uma vez que alguns impactos se repetiam em diferentes fontes e de modo a facilitar, principalmente, a etapa posterior de definição dos indicadores, os 17 impactos foram agrupados em 10 impactos-tipo, listados a seguir, sendo indicado entre parênteses a que fontes o impacto se refere:

1. Interferência sobre o uso e ocupação do solo (hidrelétrica, termelétrica a gás natural e a carvão mineral, nuclear e eólica);
2. Interferência na qualidade da água (geração termelétrica a carvão mineral);
3. Interferência na qualidade do ar (geração termelétrica a gás natural, a carvão mineral e a biomassa);
4. Geração de Resíduos Sólidos Radioativos (geração nuclear);
5. Contaminação das áreas circunvizinhas com radiação (geração nuclear);
6. Interferência sobre os Modos de Vida (geração hidrelétrica);
7. Interferência nas condições etno-ecológicas (populações tradicionais e povos indígenas) (geração hidrelétrica);
8. Contribuição para o aquecimento global (geração termelétrica a gás natural e a

- carvão mineral);
9. Poluição sonora (geração eólica); e
 10. Aversão ao Risco (geração nuclear).

Com base na literatura, foram definidos os indicadores mais apropriados para cada impacto-tipo, levando-se em consideração que estes são utilizados em uma análise de longo prazo quando, em geral, não se dispõe dos projetos/localização das plantas, portanto, devem ser tais que independam destas características. Com o intuito de se obter graus de impacto entre zero e um, foram definidos, também, os valores máximos admissíveis para cada um dos indicadores, de modo que na atribuição da nota do impacto, o grau de impacto igual a zero corresponda a ausência de impacto e o grau de impacto igual a 1 corresponda ao máximo impacto admissível.

Após a seleção de indicadores e sua quantificação (cálculo dos graus de impacto), foi definida a importância relativa (pesos) entre os impactos-tipo através do método de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process - AHP*) (SAATY, 1991)⁶, pela equipe multidisciplinar do projeto. Os impactos de mesmo tipo foram considerados como um impacto apenas, independente da fonte responsável, assim, a diferenciação de um mesmo tipo de impacto dentre as fontes é feita pelo grau de impacto, ou seja, pela magnitude do impacto ocasionado por cada fonte.

Após a definição dos pesos, cada grau de impacto foi multiplicado pelo peso do tipo de impacto, chegando a um grau de impacto que leva em consideração a importância do tipo de impacto, conforme Equação (3.1). Estes graus podem ser comparados entre si, de maneira a identificar os impactos que possuem alta magnitude e alta importância, ou seja, os impactos com os maiores graus.

$$GI^*_i = GI_i \cdot p_j \quad (3.1)$$

Onde:

GI^*_i – Grau de impacto modificado do impacto “i”;

GI_i – Grau de impacto do impacto “i” (sendo $i_{TOTAL} = 17$); e

p_j – peso do impacto-tipo “j” (sendo $j_{TOTAL} = 10$).

⁶ Método multicritério de apoio à decisão, baseado em comparações par a par, auxiliando em tomadas de decisão complexas.

A agregação dos graus de impacto modificado (GI*) em um único índice, chamado de IAEXP preliminar, pode ser feito de duas maneiras.

A primeira maneira é somar os diversos GI* dentro de uma mesma fonte “k”, encontrando o grau de impacto da fonte (IF_k). Esta soma evidencia as fontes consideradas mais impactantes e as menos impactantes, de acordo com os impactos considerados nesta metodologia.

O IAEXP preliminar é obtido por soma ponderada dos IF_k das “k” fontes, sendo o peso relativo de cada fonte a sua participação no mix da expansão (em percentual no PNE). Assim, quanto maior for a participação de uma fonte no mix da expansão, maior será a sua importância no cálculo do IAEXP preliminar. A Equação (3.2) apresenta o cálculo do IAEXP preliminar. Vale salientar que a energia total do Plano Nacional de Energia (E_{PNE}) a ser considerada será a soma das energias apenas das fontes que foram contempladas na análise dos impactos, conforme Equação 3.3.

$$IAEXP_{preliminar} = \sum_{k=1}^{NF} \frac{E_k}{E_{PNE}} \cdot IF_k \quad (3.2)$$

$$\text{Sendo: } E_{PNE} = \sum_{k=1}^{NF} E_k \quad (3.3)$$

Onde:

NF - Número de fontes consideradas;

E_k - Energia da fonte “k” no Plano Nacional de Energia nos últimos 10 anos; e

IF_k - Grau de impacto da fonte “k”.

A segunda maneira de calcular o IAEXP é somar cada grau de impacto modificado (GI*) por tipo de impacto e não por fonte, multiplicando cada GI* pelo percentual de participação no mix do Plano Nacional de Energia da fonte em questão. Desta soma, origina-se um grau de impacto para cada tipo de impacto “m” (IT_m). De posse dos diversos IT, uma comparação entre tipos de impacto pode ser feita, evidenciando o tipo de impacto mais relevante dentre os impactos considerados. Para se chegar ao IAEXP preliminar, faz-se a soma destes valores, conforme Equação 3.4.

$$IT_m = \sum_{k=1}^{NF} \frac{E_k}{E_{PNE}} \cdot GI_{m,k}^* \quad (3.4)$$

Das duas maneiras mencionadas anteriormente, chega-se ao valor de um índice de impacto do Plano Nacional de Energia preliminar (IAEXP preliminar). Este índice é denominado preliminar, pois ele ainda não se encontra dentro do intervalo entre zero e um, conforme os demais índices da Análise Multiobjetivo do Inventário.

Avaliando os 17 impactos e considerando a situação hipotética de máximo impacto para todos eles, chega-se a um IAEXP preliminar máximo admissível. Este será o maior valor possível que pode ser atribuído a este índice. O IAEXP preliminar máximo é um valor inerente ao plano da expansão a ser considerado na metodologia, uma vez que sofrerá a influência do percentual de participação das diversas fontes no mix da expansão. A Equação (3.5) apresenta como se chega ao valor do IAEXP, cujos limites admissíveis de valores se encontram entre zero e um.

$$IAEXP = \frac{IAEXP_{preliminar}}{IAEXP_{preliminarmáximo}} \quad (3.5)$$

Após os cálculos mencionados anteriormente, o IAEXP é obtido. Este índice corresponde ao impacto socioambiental negativo da expansão da geração e, levando em consideração o PNE 2030, o Projeto IAREF obteve o valor igual a 0,57. Ressalta-se que o valor deste índice foi obtido a partir de um estudo preliminar, e que para a sua real utilização como representativo do impacto fora da bacia da expansão da geração, é necessária uma discussão mais ampla envolvendo diversas entidades do setor e posterior cálculo do valor oficial a ser utilizado.

O índice de impacto individualizado para cada alternativa “a” (IACE_a) é obtido conforme a Equação (3.6).

$$IACE_a = \frac{(\Delta Ef^* - \Delta Ef_a) \times IAEXP}{\Delta Ef^*} \quad (3.6)$$

Onde:

$(\Delta E_f^* - \Delta E_{f_a})$ – Complementação energética

O índice IACE consiste, portanto, no produto do montante de energia que deixa de ser gerada na bacia em estudo por cada alternativa de divisão de quedas ($\Delta E_f^* - \Delta E_{f_a}$) pelo índice de impacto socioambiental negativo da expansão da geração (IAEXP), dividido pelo maior montante de energia firme produzido pelas alternativas de divisão de quedas da bacia em estudo (ΔE_f^*). A divisão pelo ΔE_f^* tem por objetivo tornar o IACE um índice adimensional, assim como os demais índices de impacto socioambiental e o ICB quando dividido pelo CUR. Adotar o ΔE_f^* como quociente para tornar o $IACE_a$ um índice adimensional faz com que o valor do $IACE_a$ seja igual ao valor do IAEXP, para o caso da alternativa “a” considerar a opção de não explorar o potencial hidroelétrico da bacia ($\Delta E_{f_a} = 0$), ou seja, gerar fora da bacia (ou por outra fonte) o montante equivalente a produção da alternativa com maior energia firme do estudo de inventário.

Para a incorporação do impacto socioambiental negativo fora da bacia na análise multiobjetivo dos Estudos Finais, o Projeto IAREF sugeriu três abordagens, considerando a criação de um índice de impacto socioambiental negativo modificado (IAN*), que leva em consideração o impacto socioambiental dentro (IAN) e fora da bacia (IAEXP). As três abordagens analisadas para calcular o IAN* foram:

1. Soma dos índices IACE e IAN para cada alternativa;
2. Combinação linear do IACE e IAN, através de soma ponderada dos dois índices; e
3. Combinação linear do IAN e IAEXP, onde os pesos entre os índices são fixos e proporcionais as energias firme produzidas dentro e fora da bacia, respectivamente.

A primeira abordagem apresenta um problema, pois permite que o índice IAN* seja maior do que um, o que não é desejável, dado que os demais índices variam entre zero e um. Adicionalmente, entende-se que, apesar dos índices IACE e IAN, representarem impactos, eles são distintos, não sendo coerente a simples soma, sendo mais apropriado a soma ponderada. Assim, a primeira abordagem foi descartada. Num primeiro momento, a segunda abordagem parece ser promissora, porém, para o cálculo do IAN* por esta abordagem, seria necessário, ainda, definir os pesos relativos de cada índice de tal modo

a representar a importância de cada impacto (dentro e fora da bacia). Uma vez que, um dos objetivos desta tese é alterar o método multicritério com o objetivo de reduzir a necessidade de definir peso específico para os critérios, não seria coerente aumentar ainda mais a quantidade de pesos a serem informados, quando já existe uma proposição de pesos coerente e que vai ao encontro da maneira como é calculado o outro critério de tomada de decisão (ICB). Assim, esta tese propõe a terceira abordagem de cálculo do IAN* como a abordagem mais adequada, uma vez que trata-se de uma soma ponderada dos impactos, mas não aumenta a quantidade de informação demandada, dado que os pesos entre o impacto dentro da bacia (IAN) e o impacto representativo da expansão (IAEXP) são fixos e proporcionais as energias firmes produzida na bacia e fora da bacia (conforme Equação 3.7), sendo coerente ao seu propósito. Adicionalmente, tal formulação é muito semelhante ao cálculo do ICB, que considera o custo da alternativa multiplicado pela sua energia e o CUR multiplicado pela energia complementar, e ainda mantém o valor do IAN* entre zero e um.

$$IAN^* = \frac{IAN_a \times \Delta Ef_a + (\Delta Ef^* - \Delta Ef_a) \times IAEXP}{\Delta Ef^*} \quad (3.7)$$

A alteração da análise multiobjetivo nos Estudos Finais consiste, portanto, em substituir o índice de impacto socioambiental negativo na bacia (IAN_a) pelo Índice de impacto socioambiental modificado (IAN_a*) que considera o impacto socioambiental negativo associado a energia complementar, no cálculo do Índice de Preferência conforme Equação (3.8).

$$I_a = p_{cb} \times \frac{ICB_a}{CUR} + p_{an} \times IAN_a^* \quad (3.8)$$

A partir do exposto, verifica-se que, na realidade, não se trata de incluir mais um critério na tomada de decisão, uma vez que a análise multiobjetivo final continua com três critérios, mas, trata-se de um aperfeiçoamento do critério IAN, que deixava de levar em consideração o impacto da complementação. Ampliar a abrangência do critério foi uma solução para evitar a criação de mais um critério, que demandaria mais informações pelo método multicritério, dificultando a tomada de decisão.

Além da quantificação do índice socioambiental negativo fora da bacia, o Projeto IAREF sinalizou a pertinência de considerar nos Estudos de Inventário uma alternativa adicional, denominada alternativa AA, referente a não exploração do potencial da bacia e avaliar esta alternativa frente as demais alternativas de exploração do potencial hidrelétrico da bacia. A alternativa AA teria impactos socioambientais negativo e positivo dentro da bacia iguais a zero, índice custo-benefício igual ao CUR (uma vez que a sua energia firme na bacia seria igual a zero) e impacto socioambiental fora da bacia igual ao IAEXP. O objetivo é confrontar alternativas que exploram o potencial da bacia com a não exploração deste potencial e assim, verificar a real vocação da bacia para geração de energia hidrelétrica. Esta alternativa será considerada nas aplicações dos métodos multicritério no capítulo 5.

Em resumo, neste item propõe-se como aprimoramento da abordagem multiobjetivo dos Estudos Finais do Inventário a incorporação do impacto negativo fora da bacia, alterando o índice de impacto socioambiental negativo, e a consideração da alternativa AA, que opta pelo não aproveitamento do potencial hidrelétrico da bacia em estudo de forma a explicitar as consequências desta opção.

3.2. Critério 2: Benefício Ambiental na Bacia

Tradicionalmente as usinas hidrelétricas tem sido um importante indutor do desenvolvimento socioeconômico regional. Entretanto, a maior parte do potencial hidrelétrico brasileiro remanescente está situada em bacias mais distantes dos grandes centros de consumo, geralmente em áreas de sensibilidade ambiental, com baixa ou nenhuma ação antrópica, próxima de áreas protegidas ou aptas a serem protegidas, como a região Norte do País. Neste tipo de região, o papel de indutor do desenvolvimento regional ganha um maior destaque a conservação ambiental (RAUPP et al, 2018).

Para tanto, foi desenvolvido o conceito de usina-plataforma (MME, 2013), (CEPEL, 2016), (COSTA et al., 2017a), (COSTA et al., 2017b), que busca planejar, projetar, construir e operar usinas hidrelétricas com viés de conservação ambiental permanente. Sendo assim, identificou-se a pertinência de que a análise multiobjetivo final dos Estudos de Inventário levasse em consideração não só o benefício associado ao desenvolvimento socioeconômico regional, mas também o benefício de vetor de conservação permanente.

O desenvolvimento da metodologia para incorporação deste novo benefício associado ao conceito de vetor de conservação permanente na seleção da melhor alternativa dos Estudos de Inventário, um dos objetivos desta tese, divide-se em duas partes. A primeira consiste na proposta de quantificação deste benefício, e sua transformação em um índice, ainda na etapa de Inventário, quando a quantidade de informação disponível é limitada (detalhado no item 3.2.1). A segunda refere-se à proposta de metodologia para consideração deste benefício na tomada de decisão, através da incorporação deste novo índice na análise multiobjetivo dos estudos finais dos Estudos de Inventário (detalhado no item 3.2.2).

3.2.1. Proposta para o cálculo do Benefício Ambiental

Conforme abordado em CEPEL (2016), este novo conceito de usina está intrinsecamente relacionado ao conceito de vetor de conservação permanente sintetizado através dos seguintes objetivos/aspectos:

- Aprimoramento do conservacionismo na faixa de Área de Proteção Permanente (APP);
- Manutenção dos ecossistemas naturais;
- Apoio às atividades de uso sustentável;
- Estabelecimento de relacionamento permanente e fortalecimento dos povos indígenas e comunidades tradicionais; e
- Oportunidade de pesquisa científica.

Estes cinco aspectos podem ser reorganizados em quatro grupos principais de ações e que serão os temas referentes ao benefício de vetor de conservação permanente do aproveitamento hidrelétrico (RAUPP et al., 2018). O primeiro tópico refere-se às iniciativas de conservação ambiental, que englobam os aspectos “Aprimoramento do conservacionismo na faixa de APP” e “Manutenção dos ecossistemas naturais” acima citados e os demais três tópicos referem-se a cada um dos aspectos, resultando nos seguintes benefícios a serem considerados:

- Iniciativas de conservação ambiental;
- Apoio à atividade econômica sustentável;

- Fortalecimento e relacionamento permanente com povos indígenas e comunidades tradicionais;
- Oportunidade de pesquisa científica.

De posse destes quatro tópicos e das propostas que formam a Metodologia para o desenvolvimento e implantação de projetos de usinas hidrelétricas sob o conceito de usinas-plataforma, no Quadro 1, foram identificadas as propostas que tratam destes benefícios de maneira que sua consideração esteja realmente associada a uma ação da usina-plataforma e com o intuito de levantar as potenciais informações que poderiam ser utilizadas no cálculo do índice referente ao benefício ambiental do empreendimento.

Quadro 1: Propostas associadas aos benefícios.

Benefício	Propostas associadas
Iniciativas de conservação ambiental	Na Avaliação Ambiental Integrada realizar análise conjunta das usinas hidrelétricas previstas para adotar o conceito de usina-plataforma
	Implementação do Plano de Conservação da Biodiversidade e dos Ecossistemas visando apoiar o Sistema Nacional de Unidades de Conservação
	Apoio à implantação de reservas legais em áreas contínuas e limítrofes às APPs
	Elaboração e implementação de um Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial (PACUERA) diferenciado
	Criação de Base Avançada de vigilância física e ambiental, compartilhada com os municípios, outros setores e órgãos gestores de unidades de conservação
	Apoio às iniciativas de conservação ambiental
Apoio à atividade econômica sustentável	Elaboração de Plano de Apoio às Atividades Econômicas Locais Sustentáveis específico para usina-plataforma
Fortalecimento e relacionamento permanente com povos indígenas e comunidades tradicionais	A partir dos estudos de inventário deve-se adotar a abordagem da antecipação e o princípio da participação informada para o relacionamento com povos indígenas e comunidades tradicionais
	Promover a articulação interinstitucional para viabilizar as medidas e programas de mitigação referentes ao componente indígena e comunidades tradicionais
Oportunidade de pesquisa científica	Elaboração de Plano de Fomento à Pesquisa Científica
	Fomento às pesquisas científicas para aprimoramento da base de conhecimentos sobre a biodiversidade da região

É possível que um aproveitamento hidrelétrico que não se enquadre exatamente como uma usina-plataforma, atue de forma proativa na conservação ambiental da região que se insere, atuando em um ou mais desses aspectos. Conforme explicado anteriormente, nesta tese, será utilizado o termo “usinas que atuam como vetor de conservação” (UHE_VC), englobando as usinas-plataforma e demais usinas que optem por

atuar como agente de conservação. Em ambas as situações, é importante que os benefícios ambientais oriundos dessas ações sejam considerados na tomada de decisão dos Estudos de Inventário. O índice que considera os impactos positivos na metodologia em vigor durante a elaboração desta tese não tem esta amplitude, considerando apenas aspectos socioeconômicos, conforme descrito no item 2.3.2. Isto justifica a proposição de um novo critério associado ao benefício ambiental.

De acordo com CEPEL (2016), as propostas elencadas anteriormente terão seu início após os Estudos de Inventário⁷ e, desta maneira, a informação quanto à efetivação destas ações não estará disponível durante a realização dos Estudos de Inventário para quantificação dos benefícios. Cabe ressaltar que a falta de informações mais detalhadas e a incerteza sobre a efetivação das ações definidas nos Estudos de Inventário também está presente em outras situações, como por exemplo, nos benefícios socioeconômicos que representam os impactos socioambientais positivos oriundos da implantação de usinas hidrelétricas. Muito oportunamente os benefícios foram denominados potenciais.

Porém, uma informação disponível já nos Estudos de Inventário, é a previsão de áreas a serem protegidas devido à implantação da UHE_VC na bacia, principalmente por que esta informação será utilizada na análise conjunta a ser realizada na Avaliação Ambiental Integrada (AAI). Essa é, portanto, uma informação passível de ser utilizada na análise dos benefícios ambientais como uma proxy da atuação proativa do empreendimento na conservação ambiental.

De posse desta informação, a formulação do índice referente ao benefício do vetor de conservação ambiental permanente (BENEF) será estruturada a partir da área potencial a ser protegida devido à UHE_VC, comparando-se esta área com toda a área da bacia que seria passível de receber proteção, conforme Equação (3.9). Esta razão indica o percentual de área protegida (passível de receber proteção) que o conjunto de aproveitamentos está proporcionando na bacia.

$$Ap = \left(\frac{\text{área protegida criada pela UHE_VC}}{\text{área na bacia disponível para receber proteção}} \right) \quad (3.9)$$

⁷ Com exceção da proposta “realizar análise conjunta das usinas hidrelétricas previstas para adotar o conceito de usina-plataforma”, que se inicia na etapa de Inventário, porém na fase da AAI, ou seja, num momento posterior à análise multiobjetivo para escolha da melhor alternativa de divisão de quedas.

Cabe ressaltar que o cálculo do “Ap” refere-se a áreas protegidas criadas dentro da bacia em estudo, e o levantamento desta informação segue os moldes da estimativa da “área potencial irrigável”, dado utilizado para o cálculo do Impacto Socioambiental Positivo, nos Estudos de Inventário, do aspecto “uso racional dos recursos hídricos” referente ao uso irrigação. Apesar da informação “área potencial irrigável” não estar disponível durante o Estudo de Inventário, análogo a área protegida criada pela UHE_VC, é realizada uma análise da área potencial a ser irrigada para sua estimativa.

É possível que, nas etapas subsequentes, quando forem definidas as áreas a serem protegidas, com a participação dos órgãos ambientais identifique-se que a melhor opção seja a criação desta área fora da bacia. Entretanto, em geral, esta discussão não se dá nos Estudos de Inventário e, portanto, imagina-se nesta etapa que a área a ser protegida será na bacia. Se em algum caso esta definição já estiver sinalizada na etapa de inventário, a consideração destas áreas no cálculo do “Ap” não deverá seguir a mesma lógica das áreas dentro da bacia e para tanto, poderá ser avaliado pelo grupo de especialistas a quantificação de um coeficiente de minoração de seu valor. Este coeficiente deverá refletir o benefício que esta área protegida fora da bacia contribuirá para a conservação ambiental da bacia em estudo. Sendo assim, quanto mais afastada esta área estiver da bacia em estudo ou quanto menor for a influência desta área para a conservação ambiental da bacia, menor deverá ser o valor de área a ser adicionado ao numerador do “Ap”. Além disso, para fins de cálculo do numerador do “Ap”, este valor adicional, referente à área protegida fora da bacia, somado às áreas protegidas dentro da bacia não poderá ser superior à área na bacia disponível para receber proteção.

É importante considerar que algumas áreas na bacia poderão ser desafetadas para implantação da UHE_VC, sendo assim, estas áreas deverão ser descontadas da área protegida a ser criada.

A metodologia de cálculo do benefício foi desenvolvida considerando que a informação disponível “Ap” deveria ser majorada de acordo com as ações de conservação ambiental referente aos 4 tópicos identificados, ou seja, quanto mais benefícios ambientais a UHE_VC proporcionar para a bacia, maior será a majoração de “Ap” e maior será o valor do índice referente a este benefício. Esta majoração de “Ap” é feita através de uma curva

exponencial, conforme Figura 4, evidenciando que quanto mais ações de conservação ambiental forem consideradas, mais rápido o índice benefício se aproxima de seu valor máximo. A formulação foi desenvolvida de maneira que o benefício seja um número real compreendido entre 0 e 1 conforme os demais índices considerados na análise multiobjetivo dos Estudos de Inventário.

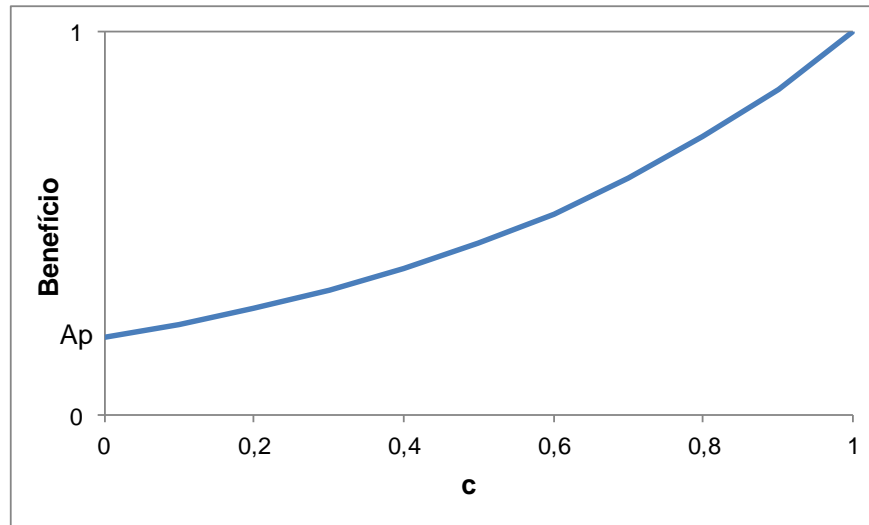


Figura 4: Curva exponencial.

A Equação (3.10) apresenta a formulação do benefício:

$$\text{BENEF} = Ap^{(1-C)} \quad (3.10)$$

Sendo:

$$C = \sum_{i=1}^4 c_i \cdot p_i \quad (3.11)$$

$$0 \leq C \leq 1 \quad (3.12)$$

$$0 \leq c_i \leq 1 \quad (3.13)$$

$$0 \leq p_i \leq 1 \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^4 p_i = 1 \quad (3.15)$$

Onde:

C – intensidade dos quatro benefícios ponderados entre si;

c_i – intensidade do benefício “i”; e

p_i – peso do benefício “i”.

Como pode ser observado na formulação, o valor de “C” é formado por quatro parcelas, cada uma referente a um benefício da UHE_VC. Cada parcela representa a intensidade do benefício multiplicado pelo seu peso, que reflete a importância relativa de cada benefício dentre os demais. A definição do peso deve levar em consideração, por exemplo, a relevância de cada benefício para a bacia, de modo a pontuar mais os benefícios mais relevantes para a região em estudo. Com relação à intensidade do benefício, foram definidos critérios para sua quantificação, de modo que esta quantificação seja realizada de forma objetiva e com informações disponíveis durante os Estudos de Inventário, assim como é feita a quantificação dos benefícios referentes ao vetor de desenvolvimento regional.

A quantificação da intensidade de benefício buscou incorporar o grau de relevância ambiental da área a ser protegida, obtendo um maior valor de “c;” para as áreas mais relevantes. A definição da relevância da área a ser protegida foi considerada de acordo com as áreas prioritárias estabelecidas pelo Ministério de Meio Ambiente no mapa “Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira” (MMA, 2004), criado por meio da Portaria nº 126, de 27/05/2004 (MMA, 2004b). Neste mapa, as áreas prioritárias são também classificadas de acordo com sua prioridade (“extremamente alta”, “muito alta” ou “alta”) e, adicionalmente, para cada área identificada como prioritária, foram feitas recomendações (MMA, 2004c) quanto ao uso da área ou ações necessárias para efetivação da conservação das mesmas. Em 2018 foi publicada a segunda atualização das áreas e ações prioritárias, por meio da Portaria nº 463, de 18/12/2018 (MMA, 2018), que se destaca pelo avanço no refinamento das informações, cujos resultados são apresentados em mapas divididos por bioma (Amazônia, Caatinga, Cerrado e Pantanal, Mata Atlântica, Pampa e Zona Costeira e Marinha).

Grande parte das recomendações e ações estão associadas aos benefícios da UHE_VC podendo ser divididas nos temas conservação ambiental, uso sustentável dos recursos naturais e levantamento de informações. Sendo assim, foi possível utilizar estas informações na quantificação dos benefícios de iniciativas de conservação ambiental (c1), apoio à atividade econômica sustentável (c2) e oportunidade de pesquisa científica (c3), cujos critérios são apresentados a seguir. Cabe ressaltar que os limites de cada classe são meramente sugestivos e poderão ser alterados mediante justificativa.

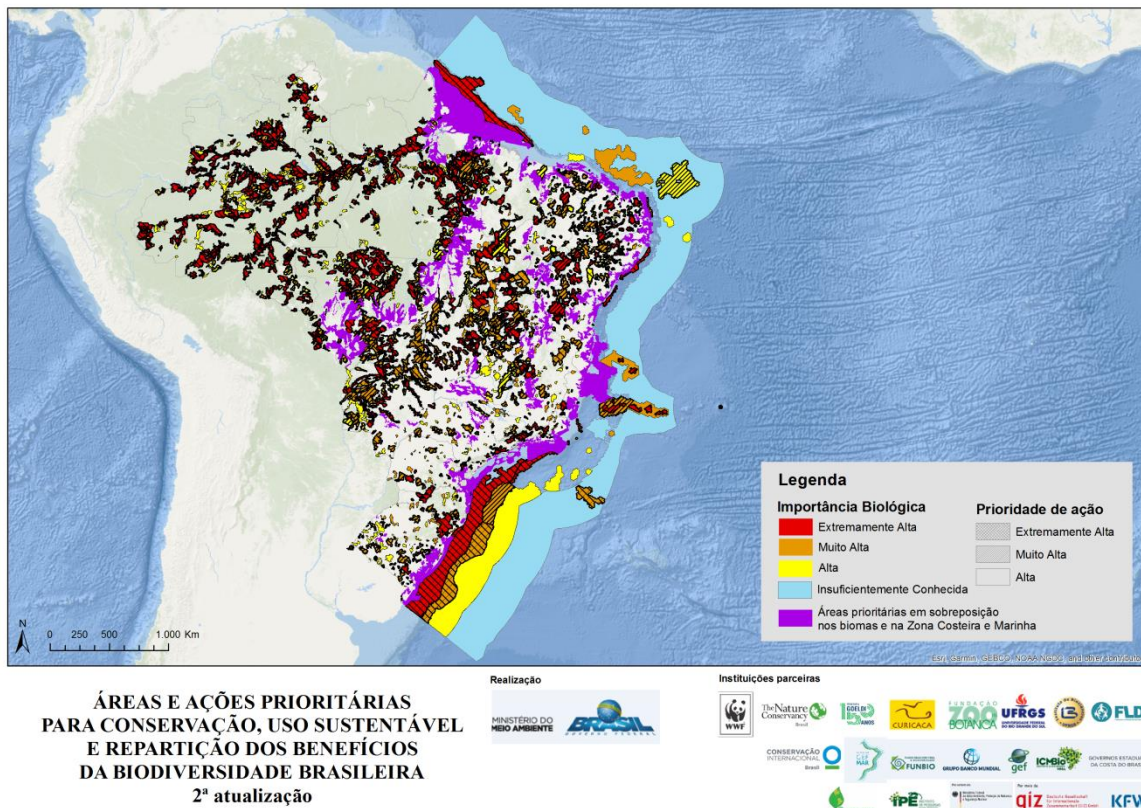


Figura 5: Mapa de Áreas Prioritárias.
(Fonte: MMA, 2019)

1. Intensidade do benefício Iniciativas de Conservação Ambiental (c1)

- $c1 = 0$: as áreas protegidas criadas pela UHE_VC não se localizam em área prioritária e ou não foram criadas considerando áreas contínuas.
- $0 < c1 < 0,5$: as áreas protegidas criadas pela UHE_VC não estão definidas como área prioritária, variando $c1$ de acordo com a consideração de áreas protegidas contínuas.
- $0,5 < c1 < 0,8$: as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área prioritária (alta, muito alta ou extremamente alta), variando $c1$ de acordo com importância da área prioritária e se foram criadas considerando áreas contínuas.
- $0,8 < c1 < 1$: as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área prioritária alta ou muito alta com recomendações de: criação de unidades de conservação, ações de fiscalização, recuperação de áreas degradadas,

consolidação de cinturão verde ou faixa/zona tampão.

- $c1 = 1$: as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área prioritária extremamente alta com recomendações de: criação de unidades de conservação, ações de fiscalização, recuperação de áreas degradadas, consolidação de corredor ecológico ou faixa/zona tampão.

2. Intensidade do benefício Apoio à Atividade Econômica Sustentável ($c2$)

- $c2 = 0$: Não há previsão de desenvolvimento de economia sustentável na área ou na área a ser fomentada pela UHE_VC.
- $0 < c2 < 0,5$: Previsão de apoio à economia sustentável e as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área que não está definida como área prioritária, variando $c2$ de acordo com a presença ou não de economia sustentável na região.
- $0,5 < c2 < 0,8$: Previsão de apoio à economia sustentável e as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área prioritária (alta, muito alta ou extremamente alta), variando $c2$ de acordo com importância da área.
- $0,8 < c2 < 1$: Previsão de apoio à economia sustentável e as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área prioritária alta ou muito alta com recomendações de: uso sustentável dos recursos naturais, realização de plano de uso sustentável, implantação de plano de utilização dos recursos naturais, apoio e incentivo às ações de uso sustentável e demais recomendações associadas.
- $c2 = 1$: Previsão de apoio à economia sustentável e as áreas protegidas criadas pela usina-plataforma se localizam em área prioritária extremamente alta com recomendações de: uso sustentável dos recursos naturais, realização de plano de uso sustentável, implantação de plano de utilização dos recursos naturais, apoio e incentivo às ações de uso sustentável e demais recomendações associadas.

3. Intensidade do benefício Oportunidade de Pesquisa Científica ($c3$)

- $c3 = 0$: Não há previsão de pesquisa científica.
- $0 < c3 < 0,5$: Previsão de pesquisa científica e as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área que não está definida como área prioritária, variando $c3$ de acordo com a biodiversidade local (baixa ou alta).

- $0,5 < c3 < 0,8$: Previsão de pesquisa científica e as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área prioritária (alta, muito alta ou extremamente alta), variando $c3$ de acordo com importância da área prioritária.
- $0,8 < c3 < 1$: Previsão de pesquisa científica e as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em: área prioritária insuficientemente conhecida ou área prioritária alta ou muito alta com recomendações de realização de: estudos para definição de ações prioritárias, elaboração de inventários biológicos, estudos antropológicos, etc.
- $c3 = 1$: Previsão de pesquisa científica e as áreas protegidas criadas pela UHE_VC se localizam em área prioritária extremamente alta com recomendações de realização de: estudos para definição de ações prioritárias, elaboração de inventários biológicos, estudos antropológicos, etc.

Quanto a intensidade do benefício Fortalecimento e Relacionamento Permanente com Povos Indígenas e Comunidades Tradicionais ($c4$), é proposta a construção de uma lógica diferente da adotada para os outros benefícios. Este benefício será contabilizado considerando os povos indígenas e o critério adotado para a quantificação da intensidade deste benefício específico irá considerar o estágio em que se encontra a terra indígena afetada pela UHE_VC em termos de regularização fundiária. Ou seja, ele irá variar de acordo com a seguinte classificação:

- Área com população indígena⁸
- Área com população indígena cuja Terra está a ser identificada
- Área com população indígena cuja Terra está em identificação
- Área com população indígena cuja Terra está declarada

Esta classificação busca mostrar os benefícios trazidos com a UHE_VC para as populações indígenas, onde o estágio de regularização fundiária poderá indicar um cenário com um diálogo mais direto e com interlocutores formalizados frente a um cenário sem interlocução formal. A hipótese é de que quanto mais regularizada a terra estiver, maiores são as possibilidades de uma interlocução mais eficaz e melhores são as chances de que os benefícios oferecidos pela UHE_VC sejam mais significativos para a comunidade.

⁸ Estas áreas se referem às demandas junto à FUNAI que ainda não foram atendidas, ou seja, que não estão nem na fila de terras indígenas a serem identificadas.

Entretanto, este é um indicador cuja intensidade deve ser avaliada pelos especialistas devido ao alto grau de especificidade das terras indígenas, podendo variar bastante entre elas. Neste sentido, a UHE_VC pode ser uma oportunidade para que as demandas não formalizadas pelo órgão indigenista oficial sejam de alguma forma atendidas, beneficiando a comunidade de uma forma que antes seria mais difícil ou demorada. Assim, somente o especialista pode inferir a intensidade deste indicador (0-1), que vai variar partindo de uma análise caso a caso.

3.2.2. Proposta de metodologia para incorporação do Benefício Ambiental na tomada de decisão final dos Estudos de Inventário

Conforme apresentado, a análise multiobjetivo dos estudos finais já considera o benefício associado ao conceito de vetor de desenvolvimento socioeconômico regional, papel já tradicional desempenhado pelos empreendimentos hidrelétricos. Porém, devido ao papel cada vez mais presente relativo à conservação ambiental, fortalecido pelas ações propostas para a nova tipologia de usina que tem como um de seus objetivos se configurar com um vetor de conservação ambiental permanente, seria importante que o índice de impacto socioambiental positivo também considerasse os benefícios provenientes deste novo objetivo, referente ao benefício ambiental. Apesar desta metodologia ter sido desenvolvida, a princípio, para usinas que atuam como vetor de conservação, é possível que existam usinas híbridas, que apesar de atuarem como vetor de conservação permanente, também contribuam para o desenvolvimento econômico regional, principalmente nas cidades-base, que, inevitavelmente, serão socioeconomicamente afetadas.

Uma forma de incorporar este critério seria não alterar a formulação dos Índices de Preferência (I) e de Preferência Modificado (I'), mas sim generalizar o índice de impacto positivo, que passaria a incluir os dois tipos de benefícios, alterando o método de cálculo do IAP, transformando-o em uma soma ponderada de dois benefícios distintos: o benefício referente ao conceito de vetor de desenvolvimento socioeconômico regional da maneira como é calculado atualmente (IAP) e o benefício referente ao conceito de vetor de conservação ambiental permanente (BENEF), ampliando o espectro de benefícios considerados neste índice. Sendo assim, o IAP modificado (IAP*) seria calculado conforme a Equação (3.16):

$$IAP^* = (\text{peso}_{V_DS} \cdot IAP) + (\text{peso}_{V_CAP} \cdot BENEFA) \quad (3.16)$$

Sendo:

$$\text{peso}_{V_DS} + \text{peso}_{V_CAP} = 1 \quad (3.17)$$

$$IAP = \sum IAE_i \cdot Pe_i \quad (3.18)$$

$$BENEFA = Ap^{(1-c)} \quad (3.19)$$

Pelo exposto, para o cálculo do IAP* e sua incorporação na tomada de decisão, é necessário informar os pesos específicos para os índices IAP e BENEFA. Estes pesos devem ser escolhidos pela equipe multidisciplinar que está desenvolvendo o Estudo de Inventário, de modo a traduzir a importância relativa de cada tipo de benefício para a bacia em estudo.

Diferentemente do IAN*, cuja formulação proposta nesta tese já indica os pesos a serem considerados nos impactos dentro e fora da bacia para cálculo do índice, a formulação do IAP* permite que os pesos variem de uma bacia para outra, de acordo com as especificidades de cada local, uma vez que, diferentes bacias poderão ter importâncias distintas em relação aos benefícios ambientais e socioeconômicos. Assim, nas bacias em que o benefício ambiental e os benefícios socioeconômicos possuem a mesma importância, poderão ser considerados pesos iguais a 0,5 para os dois índices (ou valores próximos, desde que somem 1). Em se tratando de uma bacia não muito antropizada e com presença de grandes áreas de relevância ambiental, pode-se admitir que os benefícios ambientais são mais importantes para a bacia do que os socioeconômicos, resultando em peso maior para o BENEFA. Em um caso extremo, bacias muito pouco antropizadas e com massiva presença de áreas de relevância ambiental, onde o desenvolvimento socioeconômico não seria um fator relevante a ser considerado na tomada de decisão, o peso do índice BENEFA pode vir a ser muito maior que o do IAP. Ressalta-se, porém, que utilizar peso igual a um para o BENEFA e zero para o IAP, num primeiro momento, não deveria ser uma prática, afinal, aumentar a arrecadação municipal e potencializar o uso racional dos recursos hídricos, dois dos aspectos considerados no cálculo do IAP, são impactos positivos relevantes, inclusive, para áreas onde os benefícios ambientais são extremamente importantes. Portanto, não se espera que o peso do IAP seja nulo.

Assim como no caso da incorporação do impacto socioambiental negativo da complementação energética, o benefício ambiental na bacia não foi considerado como mais um critério na tomada de decisão, uma vez que a análise multiobjetivo final continua com três critérios. Trata-se de uma ampliação da abrangência do critério IAP, de tal modo a este realmente se configurar como um índice de impacto **socioambiental** positivo e não apenas, **socioeconômico**.

Por fim, acredita-se que a maior contribuição da consideração deste benefício seja em desenvolver alternativas, nos Estudos de Inventário, com forte viés de conservação ambiental, o que é essencial para a implantação de futuros projetos hidrelétricos no Brasil. Adicionalmente, o estímulo a busca por alternativas mais sustentáveis, requer a adequada melhor avaliação deste tipo de alternativa de modo a beneficiar alternativas mais sustentáveis, o que resulta em um planejamento da expansão hidrelétrica do mesmo modo mais sustentável.

Ressalta-se que não é descartada a possibilidade de consideração em um mesmo Estudo de Inventário de alternativas que consideram esta nova tipologia de usina e também alternativas somente com projetos convencionais de modo a verificar a melhor opção para a bacia. Acredita-se que seriam estudos, principalmente, em bacias que não possuem forte vocação para conservação ambiental. Neste caso, a correta definição dos pesos dos critérios e para o cálculo do IAP* deverão refletir a realidade da bacia e serão fundamentais na tomada de decisão final.

Neste capítulo foram apresentados os novos critérios que estão sendo propostos nesta tese, detalhando tanto a sua quantificação quanto sua incorporação na tomada de decisão dos Estudos de Inventário. Ressalta-se que, quanto ao impacto fora da bacia, esta tese propõe considerar mais este critério, utilizando a quantificação proposta por CEPEL, e define uma maneira de incorporação deste novo critério, considerando as opções sugeridas por CEPEL. Quanto ao benefício ambiental, tanto a sua quantificação, quanto sua incorporação, foram desenvolvidas no âmbito desta tese e fazem parte das propostas da mesma, conforme seus objetivos específicos apresentados no capítulo 1.

Definidos os novos critérios, o próximo capítulo trata sobre métodos multicritério de apoio à decisão e os potenciais candidatos a serem considerados, para completar as propostas de alteração da tomada de decisão dos Estudos de Inventário.

4. PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO NA ANÁLISE MULTI OBJETIVO FINAL

Neste capítulo, primeiramente, será apresentada uma revisão bibliográfica de métodos multicritério (item 4.1), com o objetivo de analisar os candidatos mais promissores a serem utilizados na análise multiobjetivo final dos Estudos de Inventário. Em seguida, selecionados os potenciais candidatos, apresenta-se um maior detalhamento destes (item 4.2), para, finalmente, completar as propostas de alteração da nova abordagem multiobjetivo desta tese.

4.1. Métodos multicritério de apoio à decisão

Uma tomada de decisão está fortemente relacionada a comparação de alternativas considerando diferentes pontos de vista, com o intuito de selecionar a melhor. Assim, a decisão está intrinsecamente relacionada a uma pluralidade de pontos de vista, que chamamos de critérios, para selecionar (ou ordenar) as alternativas, tendo em mente que, dentre as possíveis alternativas, pode não existir uma que seja a melhor em todos os pontos de vista (ou critérios).

Entretanto, durante muitos anos, a ausência de arcabouço metodológico para consideração de múltiplos critérios na tomada de decisão levou a que as decisões considerassem um único critério. Muitas vezes, os demais critérios eram considerados de forma indireta, como alguns Estudos de Inventário anteriores ao Manual de Inventário de 1997.

Uma nova maneira de olhar para os problemas de decisão permitiu considerar os prós e os contras de uma pluralidade de pontos de vista na tomada de decisão: os métodos de Apoio Multicritério à Decisão. Segundo ACOLET (2008), estes métodos não conduzem a uma solução ótima, mas 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 uma situação de critérios conflitantes, buscando satisfazer as restrições com objetivos

conflitantes. Segundo CLÍMACO (2004), os métodos multicritério 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). Como citou LOKEN (2007), transformar o processo de tomada de decisão “mais bem informado”.

De acordo com POHEKAR et al. (2004), esses métodos permitem uma melhor compreensão das características inerentes ao problema de decisão, impulsionam a função dos participantes no processo de tomada de decisão e facilitam as decisões coletivas. Os métodos ajudam a melhorar a qualidade das decisões, tornando-as mais explícitas, racionais e eficientes. A negociação, quantificação e comunicação das prioridades também são facilitadas com o uso desses métodos.

Segundo CLÍMACO et al. (2003), na literatura especializada aparecem dois ramos distintos de métodos multicritério, os métodos de apoio à decisão com atributos múltiplos e os métodos de apoio à decisão com objetivos múltiplos. Os primeiros referem-se aos métodos de seleção, ordenação ou categorização de um número finito de alternativas, explicitamente conhecidas. O segundo ramo de métodos diz respeito a problemas onde as alternativas são implicitamente definidas por um conjunto de restrições.

Uma vez que a tomada de decisão dos Estudos de Inventário tem como objetivo selecionar uma alternativa dentre um número finito de alternativas viáveis, nesta tese, será enfatizado os métodos associados aos de atributos múltiplos. Existem diversos métodos de Análise Multicritério de atributos múltiplos 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, conforme Figura 6, admitindo que todas as alternativas são comparáveis. São também denominados de métodos compensatórios, pois admitem a compensação de um pior 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 et al., 2005).

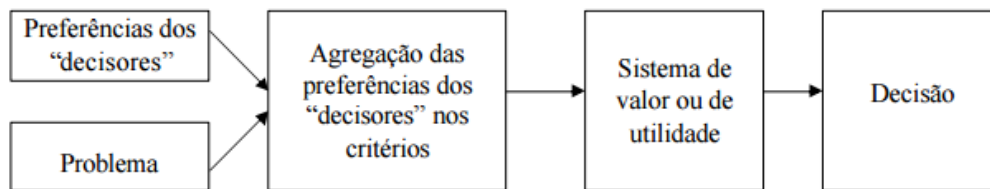


Figura 6: Fluxo de processamento dos modelos de critério único de síntese.

(Fonte: Gartner, 2001)

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 uma ordenação total das alternativas. A comparação entre critérios é realizada em uma escala de importância crescente com valores de 1 a 9, conforme Quadro 2, permitindo considerar critérios qualitativos e quantitativos.

Quadro 2: Escala de importância.

(Fonte: Saaty, 1991)

Intensidade de importância	Definição	Interpretação
1	Igualmente importante/preferível	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	importância/preferência moderada	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	importância/preferência forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	importância/preferência muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância/preferência absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

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.

No **Método da Teoria da Utilidade Multiatributo**, uma extensão da Teoria da Utilidade, o tomador de decisão escolhe a alternativa que produz a maior utilidade multiatributo a partir de um conjunto de alternativas possíveis. Uma alternativa é considerada como um conjunto de atributos e o tomador de decisão avalia cada alternativa frente a estes atributos, bem como, determina a importância de cada atributo. Para cada alternativa, os valores dos atributos são combinados com os pesos de importância e agregados em uma utilidade multiatributo, sendo preferida a alternativa com o maior valor (JANSEN, 2011).

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. O método permite extrair conclusões a

respeito das alternativas sem a necessidade de atribuição de pesos específicos (CAMPOS et al., 2006).

O método **MACBETH** (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) se assemelha ao método AHP, porém 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 possui 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 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. No ELECTRE III e IV, por exemplo, são construídas duas pré-classificações (etapa de destilação). Na destilação ascendente escolhem-se primeiro as piores alternativas e termina-se o processo com as melhores e na destilação descendente ocorre o oposto. A interseção destas duas pré-classificações resulta na ordenação final.

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, conforme Figura 7.

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 ou *trade-off*.

Tipo de Critério	Representação Gráfica	Fórmula
Verdadeiro Critério		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$
Quase Critério		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$
Pseudo Critério		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$
Critério de Nível		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$
Critério com Preferência Linear		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$
Critério Gaussiano		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$

Figura 7: Tipos de critérios.

(Fonte: LÓPEZ, 2010)

Como dito anteriormente, os métodos apresentados neste item consideram que as alternativas são definidas previamente e fazem parte de um conjunto finito. Para os casos de alternativas não explícitas a priori (e que não será objeto de estudo nesta tese), o problema pode ser solucionado por modelos de **Programação Linear Multicritério**. Estes modelos são uma extensão do modelo clássico de programação linear incorporando mais de uma função objetivo. Segundo CLÍMACO et al. (2003), o método de programação linear multicritério pode ser classificado em três categorias, de acordo com o processo utilizado para agregar a preferência do decisor na tomada de decisão:

- Métodos de agregação a priori de preferências, onde as preferências são consideradas antes de qualquer fase de cálculo;
- Métodos interativos, onde se intercalam duas fases essenciais: de cálculo, em que são calculadas soluções eficientes, e de diálogo, em que face a estas soluções o decisor expressa as suas preferências de modo a conduzir o processo interativo,

até atingir uma solução de compromisso satisfatória; e

- Métodos geradores de soluções eficientes, em que não há articulação de preferência.

Como exemplo de método interativo, pode-se citar o **TRIMAP** (CLÍMACO et al., 2003). Este método tem como base a eliminação progressiva de subconjuntos de soluções eficientes que não parecem interessantes. O processo termina quando o decisor considera conhecer o suficiente sobre o conjunto de soluções eficientes, permitindo que se tome uma decisão final.

Segundo OLSON (2001), os estudos comparativos entre as diversas modalidades de análise 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.

Em termos de aplicação destes métodos na área de planejamento energético, POHEKAR et al (2004), LOKEN (2005), TAHA et al. (2013) e OREE et al. (2017) fizeram levantamentos exaustivos e interessantes.

POHEKAR et al. (2004) e LOKEN (2005) identificaram uma mudança no planejamento energético ao longo dos anos. Durante a década de 70, os problemas consideravam apenas um único critério traduzido na relação econômico-energética, identificando a alternativa mais eficiente em termos de menor custo. A partir da década de 80, com o aumento da conscientização ambiental, houve a necessidade de incorporar variáveis ambientais e sociais na tomada de decisão, resultando no uso crescente de abordagens multicritério. As abordagens de tomada de decisão de critério único tradicionais, até então, não conseguiam mais lidar com a complexidade dos sistemas mais atuais. Assim, o número de aplicações de métodos multicritério a partir dos anos 90 cresceu enormemente.

Um paralelo pode ser feito com os Estudos de Inventário, pois, conforme apresentado no item 2.2, a tomada de decisão considerava apenas um único critério (ICB) e ao longo do tempo, a variável socioambiental foi sendo incorporada, de maneira não explícita no manual de 1984 e depois de maneira formal no manual de 1997, quando a tomada de decisão passou a ser multicritério, utilizando o método da soma ponderada para escolha da melhor alternativa. DAMAZIO et al. (1997) testaram utilizar a modelagem CONSENSUS (MARIEN, 1996) nos Estudos Preliminares dos Estudo de Inventário, considerando como critérios o ICB, o IAN e, já naquela época propuseram considerar o impacto fora da bacia, representado pela complementação energética da alternativa.

Em se tratando de problemas que consideram diferentes fontes energéticas, além da incorporação das questões socioambientais, mais recentemente, os novos desafios enfrentados estão relacionados com a integração crescente de fontes de energias renováveis intermitentes na rede (como eólica e solar) para sustentar a descarbonização do sistema de energia e a segurança energética (OREE et al., 2017).

A pesquisa de POHEKAR et al. (2004) identificou que os métodos mais utilizados são a Otimização Multiobjetivo e o AHP, seguido do ELECTRE, sendo o ELECTRE III o mais amplamente utilizado em aplicações de planejamento energético. Dentre as áreas consideradas, o planejamento de energias renováveis é o que mais utiliza métodos multicritério, seguido do planejamento de energia elétrica e alocação de recursos energéticos.

De acordo com TAHA et al (2013), mesmo após a vasta revisão da literatura contando com mais de 90 artigos, a principal questão que permanece é como escolher o método mais apropriado. POLATIDIS et al (2006) concluíram que não existe melhor ou pior método, existem os que se encaixam melhor a certa situação ou não e, assim, desenvolveram uma lista de pré-requisitos que os métodos específicos para planejamento de fontes renováveis de energia devem ter (Quadro 3) e um arcabouço metodológico com o objetivo de fornecer insights sobre a adequação dos métodos no contexto do planejamento de energia renovável. Segundo esta metodologia, para verificar a adequabilidade dos métodos, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Operacionalização das questões de sustentabilidade: o grau de compensação entre critérios permitido pelo método está relacionado com grau de operacionalização da sustentabilidade (forte ou fraco). Isto é, métodos que permitem compensar um desempenho ruim em um critério pelo bom desempenho em outro possuem uma fraca operacionalização das questões sustentáveis, uma vez que, permitem que um menor custo-benefício energético compense um alto impacto socioambiental, sem levar em conta um limite aceitável deste alto impacto, por exemplo. A Figura 8 apresenta os principais métodos, seus graus de compensação permitido e o grau de operacionalização da sustentabilidade.

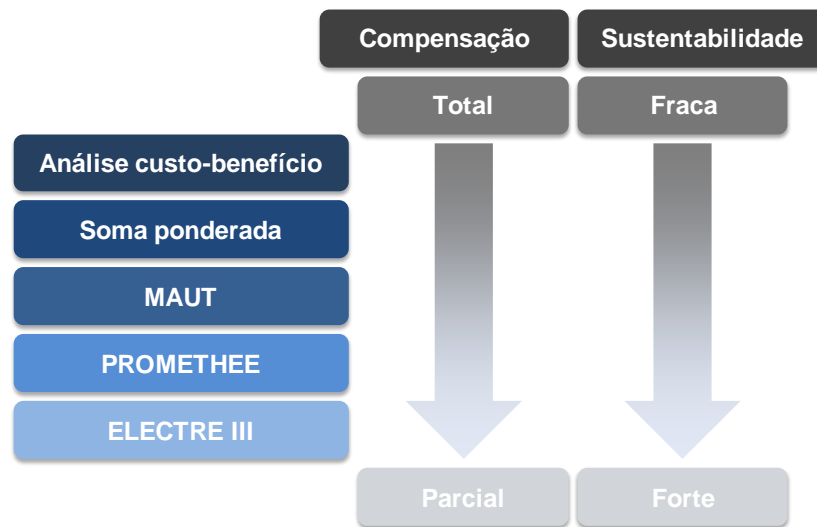


Figura 8: Métodos multicritério frente à compensação e sustentabilidade.

(Elaborado a partir de POLATIDIS et al., 2006)

- Modelagem das preferências dos decisores: Na maioria dos métodos, deve ser informado um valor numérico para cada critério de tal modo a expressar sua importância relativa, e a análise e interpretação deste valor depende exclusivamente do método escolhido. Os métodos da abordagem de critério único de síntese não aceitam que possam existir boas razões para justificar a incomparabilidade ou hesitação da preferência entre duas alternativas, assim, o valor numérico associado a cada critério (ou peso) equivale a uma taxa de substituição (compensação). Diferentemente dos métodos de sobreclassificação, que este valor está associado a uma medida da importância relativa de cada critério. Existem algumas exceções, como o método

PROMETHEE, que os pesos podem ser considerados mais como *trade-off* do que importância relativa (MUNDA, 2004) e o ELECTRE IV em que não é necessário informar pesos. Em problemas de planejamento de energias renováveis raramente são empregados métodos que requerem *trade-offs* entre critérios, devido à dificuldade dos decisores em fornecer valores explícitos de compensação.

- Características técnicas: este aspecto está associado aos dados de entrada (informações requeridas pelo método) e interação com o método. O primeiro refere-se ao tipo de informação requerida pelo método, se permite utilizar critérios qualitativos e quantitativos, sendo prudente utilizar métodos que permitam os dois tipos de informação, como o ELECTRE. O segundo relaciona-se à quantidade e natureza dos parâmetros que o decisor precisa avaliar para se familiarizar com o método. Exemplificando, o ELECTRE precisa das informações dos parâmetros de preferência, indiferença e veto e pesos dos critérios. Estas informações, muitas vezes, ajudam ao decisor a entender melhor o problema e a formar suas preferências, embora tenham significado abstrato.
- Tratamento das incertezas: em se tratando de problemas relacionados a energia e meio ambiente, os métodos de sobreclassificação são mais adequados em termos de tratamento de incertezas, uma vez que a imprecisão dos valores dos critérios podem ser modelados pelos parâmetros de indiferença e preferência, diferentemente dos métodos de critério único de síntese, que precisam utilizar intervalos ou distribuições estocásticas para considerar tais incertezas, mas que funcionam razoavelmente bem apenas em casos de incerteza fraca.
- Considerações de ordem prática: relacionados a facilidade de uso, habilidade de suportar um grande número de tomadores de decisão, critérios e alternativas, baixos requisitos financeiro e de tempo, interpretação direta dos parâmetros, quantidade de parâmetros a serem estimados. É difícil um método atender satisfatoriamente a todos estes requisitos. Segundo os autores, em problemas de energia e meio ambiente, as questões principais estão relacionadas: (i) a falta de tempo dos decisores para realizar muitas comparações par-a-par entre alternativas e critérios, o que deixa os métodos AHP e MAUT em desvantagem, (ii) facilidade de uso, de tal modo que o método não seja uma “caixa preta”, uma vez que os decisores, em geral, não são especialistas em multicritério, o que deixa o ELECTRE em desvantagem, e (iii) os parâmetros não terem significado

muito abstrato, como por exemplo, o peso dos métodos de único critério que tem um significado claro de *trade-off* entre critérios, enquanto o peso do ELECTRE não é tão evidente.

Quadro 3: Pré-requisitos das técnicas de análise de decisão multicritério para problemas de planejamento de fontes energéticas renováveis.
(elaborado a partir de POLATIDIS et al., 2006)

Pré-requisitos das técnicas de análise de decisão multicritério	Justificativa
Elicitação dos pesos	Fornecer informação de preferência entre os critérios de avaliação
Valores limites crítico (veto)	Operacionalizar a capacidade de assimilação da base ambiental, econômica, de recursos e social
Comparabilidade	Realizar uma comparação integrada entre as diferentes ações
Informação qualitativa e quantitativa	Lidar com a informação mista geralmente presente nos problemas de tomada de decisão de planejamento de fontes renováveis de energia
Rigidez	Prover resultados robustos
Tomada de decisão em grupo	Incluir um público diversificado de partes interessadas
Representação gráfica	Tornar o resultado compreensível
Facilidade no uso	Familiarizar os decisores com o processo de tomada de decisão
Análise de sensibilidade	Aumentar a transparência do processo
Variedade de alternativas	Incorporar todos os possíveis cursos de ação
Grande número de critérios de avaliação	Considerar todos os diferentes aspectos
Procedimentos de busca por consenso	Alcançar um compromisso global
Incorporação de aspectos intangíveis	Ser capaz de levar em conta as dimensões "ocultas" do problema
Incomensurabilidade	Manter os critérios de decisão em suas unidades originais e fornecer uma melhor decomposição do problema
Tratamento da incerteza	Tratar explicitamente os dados imperfeitos (incertos, imprecisos, ausentes, errôneos, etc.)
Compensação parcial	Operacionalizar uma forte concepção de sustentabilidade
Hierarquia de escala	Para diminuir as ambiguidades e fornecer consistência explícita
Parâmetros com significado concreto	Para melhorar a confiabilidade do processo
Dimensão de Aprendizagem	Reconhecer e aceitar novas informações reveladas durante a evolução do procedimento
Aspectos Temporais	Considerar a emergência da situação e esclarecer preocupações de longo e curto prazo

Pode-se dizer que, no Brasil, os Estudos de Inventário foram pioneiros na consideração explícita da variável ambiental na tomada de decisão dentro do planejamento

do setor elétrico. Estudos nacionais mais atuais estão buscando incorporar esta variável formalmente na tomada de decisão dos planos de expansão, ou seja, não mais como apenas restrições dos problemas.

ALBUQUERQUE et al. (2009) demonstrou um caminho para a aplicabilidade da Programação Linear Multiobjetivo no Planejamento da Expansão de Longo Prazo da Geração no Brasil, se baseando nos trabalhos de TRINKENREICH et al. (1980) e CLÍMACO et al. (2003). De acordo com os autores, os objetivos a serem considerados no problema são a minimização do custo total do plano de expansão, a minimização dos impactos ambientais e a maximização da confiabilidade energética, porém não é feita nenhuma discussão acerca da incorporação dos impactos ambientais.

JUSTINO et al. (2018) incorporou a variável ambiental no Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Geração considerando a emissão de gases de efeito estufa. O modelo proposto formula diferentes alternativas de expansão e calcula seus desempenhos em cada critério (emissões de gases de efeito estufa, risco de déficit e custo total de investimento e operação) utilizando os modelos MELP (Modelo de Expansão de Longo Prazo) (LISBOA et al., 2008) e NEWAVE (Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazos) (MACEIRA et al., 2018a). Para a tomada de decisão, quanto a escolha da alternativa mais preferida, foram utilizados os métodos AHP e VIP Analysis.

CONDE (2013) desenvolveu o modelo PLANEL-MO, adaptando o modelo mono-objetivo PLANEL (Modelo de Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico), de tal modo a torná-lo multiobjetivo, incorporando a dimensão ambiental por meio de três indicadores (área transformada, consumo de água e emissões de gases de efeito estufa). Para a tomada de decisão, foi adotado o método da soma ponderada, cujos pesos necessários para aplicação do método foram obtidos utilizando o método Delphi-AHP.

Entretanto estes trabalhos citados são experiências que propõem diferentes abordagens multicritério para a tomada de decisão de problemas de planejamento da expansão ou operação da geração do setor elétrico brasileiro. Os estudos do planejamento da expansão da geração e planejamento da operação atualmente em uso no setor elétrico

brasileiro ainda não adotam abordagem multicritério, com exceção dos Estudos de Inventário.

4.2. Propostas de uma nova abordagem multiobjetivo final

Conforme o que foi apresentado até aqui, a proposta de uma nova abordagem multiobjetivo para os Estudos Finais do Inventário pode ser dividida em duas classes:

- Proposta de incorporação de dois novos critérios: impacto socioambiental negativo fora da bacia (apresentado no item 3.1) e benefício ambiental na bacia (apresentado no item 3.2); e
- Proposta de novo método multicritério de apoio a decisão com o objetivo de mitigar as dificuldades do método atual, em termos de definição da única informação a ser utilizada pelo método como parâmetro, isto é, pesos específicos para os critérios.

Com relação à primeira classe, conforme apresentado no capítulo 3, as metodologias desenvolvidas para cálculo dos dois novos critérios apresentaram, também, a incorporação destes na Análise Multiobjetivo Final. No caso do impacto negativo fora da bacia, a metodologia desenvolvida pelo Projeto IAREF do CEPEL apresentou três abordagens distintas de incorporação do índice na análise multiobjetivo. Nesta tese, as abordagens foram avaliadas e se decidiu considerar apenas uma, a que se considerou ser a mais apropriada e que não demandava nenhuma nova informação (como peso, por exemplo) para cálculo dos índices das alternativas. Esta abordagem incorpora o impacto fora da bacia no índice de impacto socioambiental negativo já existente, resultando no índice de impacto socioambiental negativo modificado. No caso do benefício ambiental da bacia, tanto a metodologia de cálculo quanto sua incorporação na análise multiobjetivo foram desenvolvidas nesta tese. Assim como no caso do impacto fora da bacia, não foi criado um novo critério para o benefício ambiental, e sua incorporação no índice de impacto socioambiental positivo já existente, resultou no índice de impacto socioambiental positivo modificado. Assim, nesta tese, propõe-se que a Análise Multiobjetivo dos Estudos de Inventário continue considerando três critérios, a saber:

1. Índice custo-benefício (ICB);
2. Índice de impacto socioambiental negativo modificado (IAN*), considerando o impacto dentro e fora da bacia; e
3. Índice de impacto socioambiental positivo modificado (IAP*), considerando os benefícios socioeconômico e ambiental na bacia.

Quanto à segunda classe (proposta de novo método multicritério), com a introdução do critério socioambiental na revisão do Manual de Inventário em 1997, a escolha da melhor alternativa tornou-se uma análise multicritério. Desde então, utiliza-se o método da soma ponderada para a tomada de decisão, classificado como método compensatório, sendo necessário atribuir pesos específicos para cada critério de modo a refletir o *trade-off* ou a taxa marginal de substituição entre os critérios. A atribuição destes pesos específicos para os critérios tem sido motivo de discussões, dúvidas e crítica desde então. De acordo com o Manual de Inventário estes pesos devem ser escolhidos pela equipe multidisciplinar responsável pelo estudo de modo a refletir os anseios da sociedade. Entretanto, tal escolha é uma tarefa subjetiva e de difícil convergência.

Na Análise Multiobjetivo Final, 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). Ao final, recomenda-se realizar uma análise de sensibilidade por meio da variação dos pesos com a finalidade de buscar alternativas mais robustas.

Com a incorporação dos dois novos critérios, apesar de não aumentar o número de critérios na decisão final, esta tarefa torna-se um pouco mais trabalhosa, uma vez que, deverão continuar sendo definidos os pesos relativos entre os critérios ICB e IAN* e entre o índice de preferência e o IAP*, e, também, o peso relativo entre os critérios de benefício socioeconômico e benefício ambiental, para cálculo do IAP*. Vale ressaltar que o cálculo do novo critério IAN* já incorpora a definição dos pesos relativos entre o impacto na bacia e fora da bacia, associadas às respectivas energias firme.

Como dito anteriormente, uma das dificuldades do processo de apoio à decisão é dar valores precisos para os pesos, 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 específicos para pesos, nesta tese, propõe-se uma alteração no método multicritério de apoio a decisão da Análise Multiobjetivo Final dos Estudos de Inventário. Pretende-se optar por métodos multicritério que mitiguem esta dificuldade e não demandem a definição de valores precisos para os pesos, buscando diminuir a subjetividade das informações necessárias para a tomada de decisão.

Com esse objetivo em mente e a partir do levantamento bibliográfico dos métodos multicritério de apoio a decisão, apresentado no item 4.1, verificou-se que três métodos são potenciais candidatos: o **VIP Analysis**, o **ELECTRE III** e o **ELECTRE IV**. O primeiro método, apesar de ser considerado como compensatório, trabalha com intervalo de pesos, não demandando pesos específicos para os critérios. O segundo e terceiro métodos são classificados como não-compensatórios, demandando um tipo diferente de informação em relação ao VIP ou à soma ponderada, que são os parâmetros de preferência, indiferença e veto. O segundo método adicionalmente requer informação para diferenciar a importância dos critérios.

O **VIP Analysis** é uma ferramenta que vai ao encontro do objetivo que se busca, uma vez que foi desenvolvido para problemas em que os tomadores de decisão não podem ou não desejam fixar valores específicos para os pesos. O método requer informações parciais sobre os pesos, isto é, intervalos e/ou restrições lineares, não sendo necessário informar explicitamente o valor dos pesos para cada critério, e permite buscar soluções robustas, tentando identificar, interativamente, a alternativa mais satisfatória.

De acordo com DIAS et al (2000 e 2005), o VIP Analysis tem a finalidade de auxiliar a avaliação de um conjunto discreto de alternativas com o objetivo de selecionar a alternativa preferível de acordo com uma função aditiva de agregação com múltiplos critérios. O valor de uma alternativa a_i é a soma de seus valores para “n” critérios ($v_1(a_i)$, ..., $v_n(a_i)$) ponderada por seus pesos $k = (k_1, \dots, k_n)$ que representam indiretamente a importância de cada critério.

$$V(a_i, k) = \sum_{j=1}^n k_j v_j(a_i), \text{ onde: } \sum_{j=1}^n k_j = 1 \text{ e } k_j \geq 0 \quad (4.1)$$

Seja “K” o conjunto de todas as combinações dos valores dos parâmetros que satisfazem a todas as restrições estabelecidas. Uma vez estabelecido “K”, o VIP Analysis pode ser usado para obter conclusões robustas e identificar quais resultados são mais afetados pela imprecisão nos valores dos parâmetros (os resultados que variam mais). A partir de um conjunto “K” de combinações aceitáveis de valores para os parâmetros de importância e de um conjunto $A = (a_1, \dots, a_m)$ de alternativas, o VIP Analysis gera, entre outros, os seguintes resultados:

- A gama de valores para cada alternativa $a_i \in A$, do mínimo ($\min\{V(a_i, k)\}$) ao máximo ($\max\{V(a_i, k)\}$) da função aditiva. Se o maior valor possível de uma alternativa a_x estiver sempre abaixo do menor valor possível de outra alternativa a_y , então a primeira alternativa poderá ser descartada (é uma alternativa absolutamente dominada);
- A maior diferença de valores para cada par ordenado de alternativas $(a_i, a_j) \in A^2$, isto é, $\max\{V(a_i, k) - V(a_j, k) : k \in K\}$. Se a maior diferença entre duas alternativas for negativa ou nula, então $V(a_j, k) \geq V(a_i, k)$ para todo $k \in K$, que é denotado como $a_j \Delta a_i$ (a_j “domina” a_i). A partir destes resultados, calcula-se a matriz de confrontação onde cada elemento da matriz é a diferença máxima de valores entre duas alternativas;
- Para cada alternativa $a_i \in A$, o máximo arrependimento (*Max Regret*) (equação 4.2) associado com a escolha desta alternativa, ou seja, a diferença máxima entre o valor de a_i e das demais alternativas considerando aquelas que devem ter um valor maior que a_i dado K.

$$Max\ Regret(a_i) = \max_{k \in K} \left\{ \max_{j=1, \dots, m} \{V(a_j, k)\} - V(a_i, k) \right\} \quad (4.2)$$

Se o máximo arrependimento (*Max Regret* (a_i)) for negativo ou zero, então pode-se dizer que a alternativa correspondente (a_i) é ótima.

Assim, no VIP, a tomada de decisão quanto a alternativa preferível leva em consideração diversas análises, de modo que assegure o decisor quanto a decisão tomada. O método obtém conclusões robustas que são verdadeiras para todas as funções de valores aceitáveis considerados. O método fornece informações aos tomadores de decisão

sobre como as alternativas são afetadas pela variabilidade dos parâmetros considerados, permitindo explorar o problema por meio de vários métodos, aprimorando sua capacidade de escolher a alternativa mais preferida e assegurar o tomador de decisão quanto a sua escolha.

Apesar do VIP permitir compensar um bom desempenho em um critério pelo desempenho ruim em outro, sua vantagem em relação ao método atualmente utilizado nos Estudos de Inventário, é a não necessidade de informar pesos específicos, uma vez que o método trabalha com intervalo de pesos e busca identificar a alternativa mais robusta. A busca por alternativas robustas é sugerida no Manual de Inventário, entretanto, pelo método atual, esta busca é realizada através da variação dos pesos, sem uma metodologia formal, o que pode se tornar complexo.

Quanto aos métodos não-compensatórios, chegou-se, num primeiro momento, a um potencial candidato de método a ser utilizado, o **ELECTRE IV** (HUGANNARD et al., 1982 e VALLÉE et al., 1994), sendo este o único método pertencente a família ELECTRE para resolver problemas onde o agente de decisão não precisa determinar pesos para os critérios. Num segundo momento, com o objetivo de diferenciar a importância dos critérios ICB e IAN* em relação ao critério IAP*, conforme recomendação do Manual de Inventário, verificou-se que um segundo método da família ELECTRE, o **ELECTRE III**, também seria um potencial candidato, por necessitar de uma informação adicional em relação ao ELECTRE IV, que diferencia a importância dos critérios na ordenação das alternativas. É importante salientar que nos métodos não-compensatórios os pesos entre critérios são uma medida de importância que cada critério tem para o decisor, diferentemente dos métodos compensatórios que os pesos refletem um taxa marginal de substituição (como é o caso da soma ponderada, método atualmente utilizado na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, onde os pesos dos critérios tem que somar um).

Os métodos da família ELECTRE estão relacionados a Escola francesa, considerados como métodos mais flexíveis, por aceitar a incomparabilidade entre as alternativas. Estes métodos buscam identificar relações de superação entre as alternativas que estejam bem definidas para o decisor. Apesar do objetivo destes métodos ser a ordenação das alternativas, nesta tese, eles serão utilizados com o intuito de auxiliar na

tomada de decisão quanto a escolha da alternativa preferível de exploração do potencial hidrelétrico da bacia.

Os dois métodos (ELECTRE III e IV) obtêm 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. Opcionalmente pode ser utilizado ainda um terceiro parâmetro “v”, parâmetro de veto, relacionado ao limite de veto, que indica que uma eventual variabilidade no desempenho das alternativas seria capaz de inviabilizar uma em detrimento a outra. De posse destes parâmetros (e dos pesos para o método ELECTRE III), para cada critério, as alternativas são comparadas par a par para construção da relação de subordinação, que expressa a intensidade com que se pode afirmar que uma alternativa subordina a outra (intensidade com que uma alternativa é ao menos tão boa quanto a outra).

No caso do ELECTRE III, a relação de subordinação é construída a partir do cálculo de:

- Índice de Concordância Parcial, que expressa a intensidade, para cada critério, da afirmação que a alternativa “a” é ao menos tão boa quanto a alternativa “b”;
- Índice de Concordância Global, que expressa a concordância da afirmação que “a” subordina “b”, considerando todos os critérios;
- Índice de Discordância, que exprime a medida, para cada critério, da recusa à afirmação de que “a” subordina “b”;
- Índice de Credibilidade, que expressa o quanto se admite que “a” subordina “b” globalmente, utilizando-se o conceito de discordância (índice de discordância) para enfraquecer o conceito de concordância (índice de concordância global).

No caso do ELECTRE IV, 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”;

- 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 destas relações, para cada par de alternativas (a,b) define-se a relação de dominância apresentada a seguir, que permite atribuir um valor para o Índice de Credibilidade (G).

- Quase 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 num 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 $G(a,b) = 0,2$.

Para os dois métodos, 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” (alb): 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.

A partir do exposto, verifica-se que os dois métodos ELECTRE tem em comum a utilização de parâmetros de preferência, indiferença e veto, que são conceitualmente diferentes das informações requeridas pelos métodos da soma ponderada e VIP Analysis. Este tipo de informação permite que sejam construídas relações de indiferença, preferências fraca ou forte ou incomparabilidades entre alternativas. Além disso, o problema é formulado de tal maneira que as alternativas melhor posicionadas na ordenação são preferidas em relação a maioria dos critérios e não causam um nível inaceitável de descontentamento em qualquer um dos critérios (POHEKAR, 2004). Vale ressaltar que os métodos não garantem a total ordenação das alternativas, mas esta questão será melhor abordada nos itens de aplicação dos métodos (itens 5.6 e 5.7).

Em resumo, a partir do que foi apresentado nos capítulos 3 e 4, esta tese propõe uma abordagem de incorporação dos dois novos critérios (impacto socioambiental negativo fora da bacia e benefício ambiental na bacia) e identificou três potenciais candidatos de método multicritério de apoio à decisão (VIP Analysis, ELECTRE III e ELECTRE IV), totalizando três propostas de nova abordagem para a Análise Multiobjetivo Final dos Estudos de Inventário. Para testar a aplicabilidade das abordagens propostas, no próximo capítulo (capítulo 6) serão apresentados os resultados das aplicações.

Por fim, é importante destacar que a utilização dos métodos supracitados na análise multiobjetivo final altera apenas a informação dos pesos específicos da tomada de decisão final, isto é, dos pesos dos critérios ICB, IAN* e IAP*, não alterando a necessidade de informar os demais pesos intracritérios, ou seja, os pesos necessários para cálculo dos índices, a saber:

- peso dos índices IAP e BENEf para cálculo do IAP*;
- pesos para cálculo do índice IAN;
- pesos para cálculo do índice IAP;

Porém, diferentemente dos pesos utilizados na análise multiobjetivo final, que tem o objetivo de ordenar as alternativas dada uma configuração de pesos, os demais pesos são utilizados com o propósito de traduzir numericamente a parcela de participação ou importância/relevância que cada eixo ou tema tem para composição do todo e, assim, obter um valor de índice que represente o impacto (negativo ou positivo) de cada alternativa. Neste sentido, para auxiliar na escolha destes pesos de maneira a facilitar a exprimir a opinião da equipe multidisciplinar, também podem ser utilizados métodos multicritério, como por exemplo, o método AHP. Este método foi utilizado de forma promissora para definição do peso dos impactos na composição do IAEXP e outras aplicações com sucesso podem ser encontradas em THEODOROU et al. (2010) e CONDE (2013). Além disso, o Manual de Inventário também sugere sua utilização para definição dos pesos entre os componentes-síntese para cálculo do Impacto Socioambiental Negativo (IAN).

5. ESTUDO DE CASO: BACIA DO MÉDIO TOCANTINS

Neste capítulo serão apresentados os cálculos dos novos critérios detalhados no capítulo 3 e as aplicações das abordagens candidatas identificadas no capítulo 4, para verificar a aplicabilidade das mesmas. Para tanto, utilizou-se um estudo de caso baseado em um Estudo de Inventário real, da bacia do Médio Tocantins, elaborado em 1987, disponibilizado pela Eletrobrás (THEMAG ENG, 1987). Vale ressaltar, que no Inventário do Médio Tocantins não foi considerado o Impacto Socioambiental Negativo e Positivo, por ele ser anterior ao Manual de 1997. Porém, estes impactos foram calculados posteriormente, cada um em seu momento, a partir de dados existentes, sem levantamentos de campo adicionais, e por equipes distintas, que não participaram do Estudo de Inventário original. Estas “atualizações” do Estudo de Inventário tiveram como finalidade, num primeiro momento, testar o novo critério de impacto socioambiental negativo proposto no Manual de 1997 e, num segundo momento, testar o novo critério de impacto socioambiental positivo proposto no Manual de 2007, permitindo que este estudo de caso estivesse completo para utilização do Manual de 2007 (CEPEL, 1997a), (CEPEL, 1997b), (CEPEL, 1998).

Este capítulo se divide em 8 itens. O item 5.1 apresenta as descrições do estudo de caso referentes à bacia e ao Estudo de Inventário. O item 5.2 apresenta o cálculo do impacto negativo fora da bacia, conforme metodologia de incorporação proposta no item 3.1 e o item 5.3 apresenta o cálculo do critério de benefício ambiental, conforme proposto no item 3.2. Os itens 5.4 a 5.7 apresentam os resultados das aplicações dos métodos multicritério conforme as abordagens listadas a seguir, e o item 5.8 traz uma conclusão comparando os resultados mais representativos dos quatro métodos considerados.

- Item 5.4 (abordagem 1): Método da soma ponderada (método atual), ou seja, considerando apenas a alteração no cálculo dos critérios IAN e IAP e sem alteração no método multicritério, para verificar a influência dos novos critérios IAN* e IAP* na tomada de decisão;
- Item 5.5 (abordagem 2): Método VIP Analysis;
- Item 5.6 (abordagem 3): Método ELECTRE III; e
- Item 5.7 (abordagem 4): Método ELECTRE IV.

Todas as abordagens consideraram os mesmos três critérios (ICB, IAN* e IAP*), ou seja, os critérios com as alterações propostas nesta tese. Adicionalmente foram considerados casos variando o peso das duas parcelas de benefício (ambiental e socioeconômico) para cálculo do impacto socioambiental positivo modificado, considerando pesos iguais para os dois benefícios e, também, dando maior importância para o benefício ambiental.

5.1. Caso referência: Metodologia Manual de Inventário 2007

O Estudo de caso utilizado se baseou no Estudo de Inventário do Médio Tocantins. A bacia do rio Tocantins, que pode ser dividida em Baixo, Médio e Alto Tocantins, possui uma vazão média anual de 10.900m³/s e uma área de drenagem de 767.000Km², que representa 7,5% do território nacional, distribuída pelos Estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Pará e Maranhão, além do Distrito Federal.

Para os Estudos Finais do Inventário, as características do estudo de caso são:

- 23 locais barráveis, de acordo com a topologia da Figura 9;
- 26 projetos com reservatório; e
- 9 alternativas de divisão de queda, conforme Quadro 4.

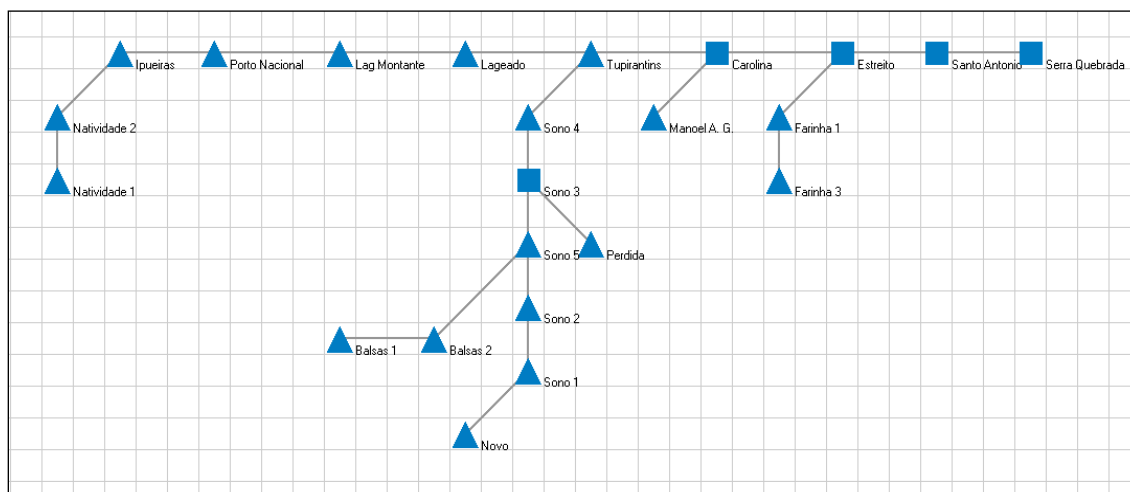


Figura 9: Topologia da bacia.

(Fonte: CEPEL, 2018)

Quadro 4: Alternativas de divisão de quedas dos Estudos Finais.

Projetos	Alternativas					
	1R	3R	7A	7B	9A	9B
Balsas 1	X	X	X	X	X	X
Balsas 2	X	X	X		X	
Carolina 1			X	X	X	X
Estreito 2	X	X				
Farinha 1	X	X				
Farinha 3			X	X	X	X
Ipueiras	X	X	X	X	X	X
Lageado	X	X	X	X	X	X
Manoel A. G.	X	X	X	X	X	X
Natividade 1	X	X	X	X	X	X
Natividade 2	X	X	X	X	X	X
Novo	X	X	X	X	X	X
S. Antonio 1		X				
S. Antonio 2					X	X
S. Quebrada 1	X					
S. Quebrada 2			X	X		
Sono 1	X	X	X	X	X	X
Sono 2	X	X	X		X	X
Sono 3A			X		X	
Sono 3B				X		X
Sono 4	X	X				

Apesar das alternativas apresentarem uma grande quantidade de projetos, suas diferenças não são significativas. Os projetos Balsas 1, Ipueiras, Lageado, Manoel A.G., Natividade 1 e 2, Novo e Sono 1 fazem parte de todas as alternativas. As diferenças das alternativas se encontram, principalmente, na parte mais a jusante da bacia, alternando o projeto mais a jusante entre Serra Quebrada 1, Serra Quebrada 2, Santo Antônio 1 e Santo Antônio 2. Os projetos Serra Quebrada 1 e 2 se localizam no mesmo local barrável (Serra Quebrada) e se diferenciam pelas cotas mínima e máxima dos reservatórios. Ambas possuem canal de fuga na mesma cota (103 metros), sendo Serra Quebrada 1 com cota mínima 122 metros e máxima 132 metros e Serra Quebrada 2 com cota mínima 131 metros e cota máxima 145 metros. Similarmente, os projetos Santo Antônio 1 e 2 pertencem ao mesmo local barrável (Santo Antônio), possuem mesma cota do canal de fuga (109 metros, ou seja, local barrável um pouco mais a montante que Serra Quebrada) e se diferenciam pelas cotas mínima e máxima, 124 metros e 132 metros, respectivamente, para Santo Antônio 1 e 133 metros e 145 metros para Santo Antônio 2. Os projetos Serra Quebrada 2 e Santo Antônio 2 alagam o canal de fuga de Estreito 2 (cota 132 metros), então, este projeto só é considerado nas alternativas que incluem os projetos Serra Quebrada 1 ou

Santo Antônio 1 (vide Figura 10). Do mesmo modo, o projeto Sono 4 alaga o local barrável dos projetos Sono 3A e Sono 3B.

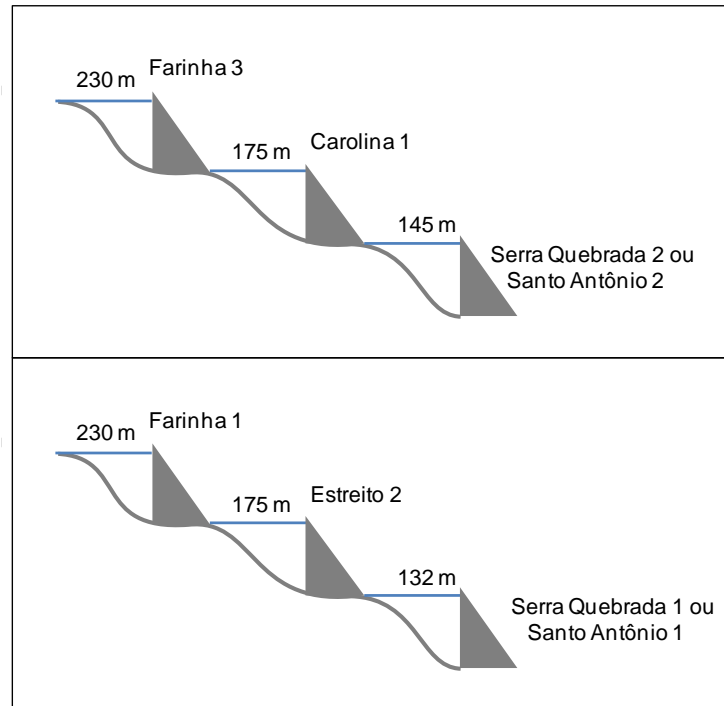


Figura 10: Perfil longitudinal do rio, ilustrando os três primeiros projetos mais a jusante.

Na Figura 11 são apresentados, no lado esquerdo, todos os locais barráveis da bacia e, no lado direito, uma das alternativas dos Estudos Finais (1R), bem como a localização da bacia no canto superior direito.

Na Tabela 1 são apresentados os índices dos critérios considerados na análise multiobjetivo dos Estudos Finais do estudo de caso. Para cada critério foram marcadas em verde as melhores alternativas e em vermelho as piores. Os critérios ICB e IAN são de minimização, então quanto menor melhor, e o critério IAP é de maximização, então quanto maior melhor.

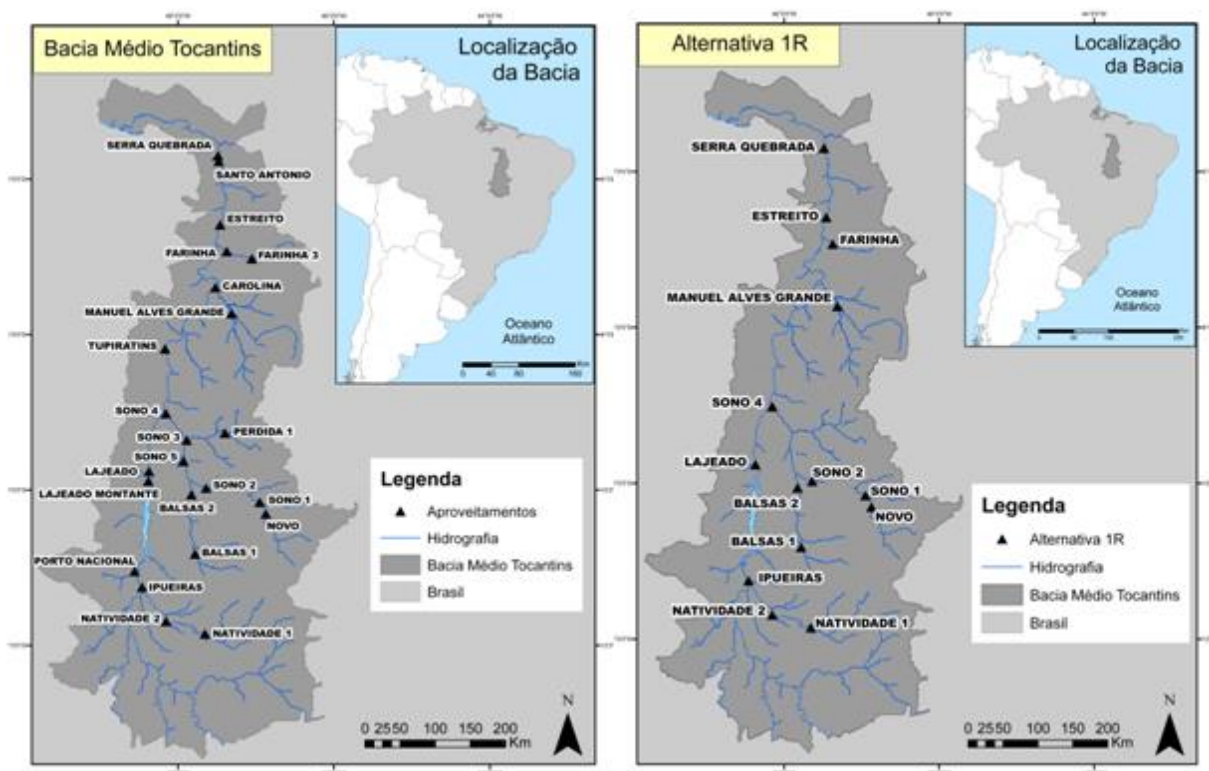


Figura 11: Bacia do Médio Tocantins.

(Fonte: CEPEL, 2018)

Tabela 1: Desempenho das alternativas.

Alternativas	Energia Firme (MWmed)	Complementação energética (MWmed)	ICB/CUR	IAN	IAP
7A	2612	104	0,535	0,614	0,280
9A	2473	243	0,566	0,609	0,310
7B	2716	0	0,543	0,667	0,300
1R	2650	66	0,570	0,617	0,230
9B	2581	135	0,573	0,658	0,340
3R	2510	206	0,611	0,611	0,230

A alternativa 7B é a que apresenta maior energia firme, ou seja, aquela que aproveita o maior potencial hidrelétrico da bacia, apresentando um dos menores ICBs. A alternativa 3R é a que apresenta o maior ICB, ou seja, a menos eficiente energeticamente e a alternativa 7A é a que apresenta o menor valor de ICB, sendo a mais eficiente energeticamente. Em termos de impacto negativo, a alternativa 7B (que gera mais energia) é a que mais impacta a bacia e a alternativa 9A é a que menos impacta, sendo a alternativa

que gera menos energia. As alternativas 1R e 3R apresentam menor IAP e a alternativa 9B é a que apresenta maior IAP, ou seja, a que apresenta mais impactos positivos.

A aplicação da metodologia segundo o Manual de Inventário considerou a metodologia atual da Análise Multiobjetivo Final, na qual a variável decisora é o Índice de Preferência Modificado (I') e considera como método multicritério a abordagem da soma ponderada, conforme equação 5.1 e 5.2.

$$I_a = p_{cb} \times \frac{ICB_a}{CUR} + p_{an} \times IAN_a \quad (5.1)$$

$$I'_a = (1 - p_{ap}) \cdot I_a + p_{ap} (I - IAP_a) \quad (5.2)$$

Os valores definidos para os pesos foram:

$$p_{cb} = p_{an} = 0,5$$

$$p_{ap} = 0,17$$

O resultado é apresentado na Tabela 2 e a alternativa vencedora (que obteve menor valor para o I') é a alternativa 7A. Observa-se que as alternativas possuem Índice de Preferência Modificado muito próximos, principalmente as alternativas 7B, 9B e 1R. A alternativa 3R é a pior alternativa.

Tabela 2: Ordenação das alternativas.

Ordem	Alternativa	I'
1	7A	0,599
2	9A	0,605
3	7B	0,621
4	9B	0,623
5	1R	0,624
6	3R	0,638

5.2. Cálculo do Impacto Socioambiental Negativo Modificado (IAN*)

Neste item foram calculados os valores do critério IAN* para as 6 alternativas consideradas. Conforme apresentado no item 3.1, esta tese propõe que o impacto fora da bacia seja incorporado ao critério IAN por meio da soma ponderada dos dois impactos, dentro da bacia (IAN) e o representativo fora da bacia (IAEXP), considerando como ponderação, respectivamente, os valores da energia firme gerada pela alternativa dentro da bacia e da complementação energética necessária para igualar a produção de energia da alternativa com o potencial hidrelétrico máximo da bacia (ou seja, a energia da alternativa que gera mais). O valor de IAEXP considerado foi 0,57, calculado por CEPEL (2012) no âmbito do Projeto IAREF, tendo como referência as informações do Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), plano mais atual vigente durante a elaboração desta tese.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados do critério IAN* para as alternativas do estudo de caso, bem como, as informações necessárias para seu cálculo.

Tabela 3: Valor do critério IAN* por alternativa.

Alternativas	Energia Firme (MWmed)	Complementação energética (MWmed)	IAN	IAN*
7A	2612	104	0,614	0,612
9A	2473	243	0,609	0,606
7B	2716	0	0,667	0,667
1R	2650	66	0,617	0,616
9B	2581	135	0,658	0,654
3R	2510	206	0,611	0,608

Ressalta-se que, neste estudo de caso, a consideração do impacto fora da bacia não alterou a ordenação das alternativas, sendo explicado pelos altos impactos das alternativas, superiores ao valor do IAEXP (índice representativo do impacto socioambiental fora da bacia da expansão da geração). Por conta disso, a pior alternativa em termos de impacto ambiental continua sendo a 7B e a melhor continua sendo a 7A. Em geral, o que se espera é que o valor do IAEXP seja superior aos impactos e que sua consideração possa alterar a ordenação das alternativas considerando apenas este critério, de modo a poder influenciar na tomada de decisão.

Para exemplificar que a incorporação do critério IAN* na tomada de decisão pode alterar os impactos das alternativas, a seguir, são apresentadas aplicações de sua incorporação nos estudos finais de Estudos de Inventário reais, obtidos em CEPEL (2012), a saber: Estudo de Inventário do rio Xingu (ELETROBRAS/ELETRONORTE/CCORREIA/ODEBRECHT, 2007) (Tabela 4) e do rio Tibagi (EPE/CNEC, 2010) (Tabela 5).

Tabela 4: Resultado referente ao Inventário da bacia do rio Xingú.

Alternativas	EF (MW)	EF complementar (MW)	ICB/CUR	IAN	IACE	IAN*
1	6711	0	0,541	0,427	0,000	0,427
2	6157	554	0,584	0,411	0,047	0,424
3	4796	1915	0,586	0,276	0,163	0,360
AA	0	6711	1	0	0,570	0,570

Tabela 5: Resultado referente ao Inventário da bacia do rio Tibagi.

Alternativas	EF (MW)	EF complementar (MW)	ICB/CUR	IAN	IACE	IAN*
15	247	5	0,902	0,235	0,011	0,242
16	229	23	0,914	0,228	0,052	0,259
19	252	0	0,893	0,236	0,000	0,236
20	235	17	0,905	0,23	0,038	0,253
21	240	12	0,804	0,233	0,027	0,249
22	222	30	0,816	0,226	0,068	0,267
AA	0	252	1	0	0,570	0,570

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, observa-se que a consideração do IAN* alterou o desempenho ambiental das alternativas nos dois casos. No caso do rio Xingu, a alternativa 3 que possuía o menor IAN, apesar de continuar sendo a melhor alternativa ambientalmente, seu IAN* teve um aumento significativo e, por ser a pior alternativa em termos de ICB, sua posição na ordenação das alternativas pode ser alterada dependendo da escolha dos pesos de cada critério. Utilizar peso acima de 0,60 para o critério ICB resulta na escolha da alternativa 1 como a preferível e valores abaixo resulta na alternativa 3 como a preferível. Observa-se que, como a alternativa 3 gera muito menos que as demais, ela estava sendo beneficiada devido a não consideração do impacto de sua complementação energética. No caso do rio Tibagi, a ordenação das alternativas

considerando apenas o critério socioambiental foi completamente alterada. A alternativa 22 que apresenta o menor IAN é a que apresentou o maior valor do índice IAN*, devido, principalmente, sua maior necessidade de complementação energética.

5.3. Cálculo do Benefício Ambiental

De modo a verificar a eficácia e performance do novo critério proposto, o Benefício Ambiental foi aplicado no estudo de caso considerado. Para o cálculo do benefício ambiental foram utilizados mapas georreferenciados da bacia em estudo com as informações da área dos reservatórios do Estudo de Inventário, áreas prioritárias e áreas protegidas já existentes na bacia, englobando unidades de conservação de proteção integral e uso sustentável, terras indígenas, florestas públicas, geoparques e corredores ecológicos. A partir destas informações, foram delimitadas as áreas aptas a receber proteção na bacia, para cálculo do “Ap”.

5.3.1. Definição da área protegida criada pelos projetos hidrelétricos

De acordo com as ações propostas para o projeto de usinas que atuarão como vetor de conservação (UHE_VC), a escolha das áreas protegidas a serem criadas deve priorizar, dentre outras, a manutenção da maior área vegetal contínua possível, evitando formação de mosaicos na paisagem, e a formação de corredores ecológicos, permitindo a conexão de fragmentos florestais, favorecendo o aumento das taxas de migração e a mobilidade das espécies de fauna, dentre outras. Deverão ser potencializados os corredores de ligações com os fragmentos florestais que se encontram próximos da área a ser restaurada, aumentando desta forma a porção de áreas florestadas, contíguas em toda a região, o que, ecologicamente, é mais significativo do que uma paisagem com áreas pequenas e desconexas. Segundo SIMBERLOFF et al (1992), existem pelo menos quatro princípios fundamentais favoráveis aos corredores ecológicos: i) reduzir os efeitos de borda; ii) promover a mobilidade das espécies; iii) reduzir a estocasticidade demográfica e iv) promover as taxas de migração. Essa integração pode ser feita conectando áreas como Área de Proteção Permanente (APPs), Reservas Legais, Unidades de Conservação, que por vezes permanecem perdidas na paisagem e sem conexão entre si.

A criação de APPs no entorno de reservatórios artificiais destinados à geração de energia já é uma obrigação e, de acordo com o Novo Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), deve observar os limites mínimo e máximo, respectivamente, de 30 metros e 100 metros. Sendo de obrigação do empreendedor a aquisição, desapropriação ou instituição de servidão administrativa das áreas destinadas à criação da APP. De acordo com CEPEL (2016), COSTA et al. (2017a) e COSTA et al. (2017b), para as UHE_VC se prevê uma largura variável para as APPs com o objetivo de permitir ligações com outras áreas de proteção, buscando diminuir a fragmentação destas áreas, mas respeitando os limites mínimos impostos pela legislação vigente. Portanto, toda a região do entorno do reservatório deve ser avaliada com critérios adequados visando obter ganhos significativos na conservação dos ambientes naturais diante dos recursos disponíveis. A flexibilidade para a definição de faixas variáveis (e não um valor fixo) é um recurso muito importante para a otimização dos recursos disponíveis na implantação da APP.

Assim, o primeiro passo para a proposição das áreas a serem protegidas é a definição das áreas de APP. Nesta aplicação, foi fixada uma largura média de 500 metros para as áreas de APP, sendo assim, em média 400 metros acima do valor máximo da atual legislação. De posse das áreas aptas a receber proteção, a escolha das áreas adicionais a serem protegidas (além das APPs já definidas) foi feita analisando cada projeto em detalhe com o objetivo de identificar áreas protegidas já existentes próximas aos reservatórios, bem como, a presença de áreas prioritárias, além da possibilidade de formação de corredores ecológicos. Os projetos foram, também, analisados em conjunto com os demais projetos das alternativas das quais fazem parte (e respectivas áreas protegidas criadas), tendo como foco a criação de áreas protegidas contínuas. Os critérios utilizados nesta aplicação para escolha das áreas foram:

- Cada projeto deveria criar áreas protegidas de pelo menos o tamanho da área alagada de seu reservatório, já incluídas nesta conta as áreas de APP que extrapolam a legislação atual;
- Selecionar locais classificados como áreas prioritárias, principalmente aquelas definidas como “muito alta” ou “extremamente alta”;
- Unir as áreas de APP a áreas protegidas já existentes, de forma a integrar as áreas protegidas em uma maior; e
- Formar corredores ecológicos entre as APPs, as áreas protegidas já existentes e as

áreas protegidas criadas pelo projeto;

A Figura 12 apresenta esquematicamente exemplos de áreas protegidas criadas seguindo estes critérios.

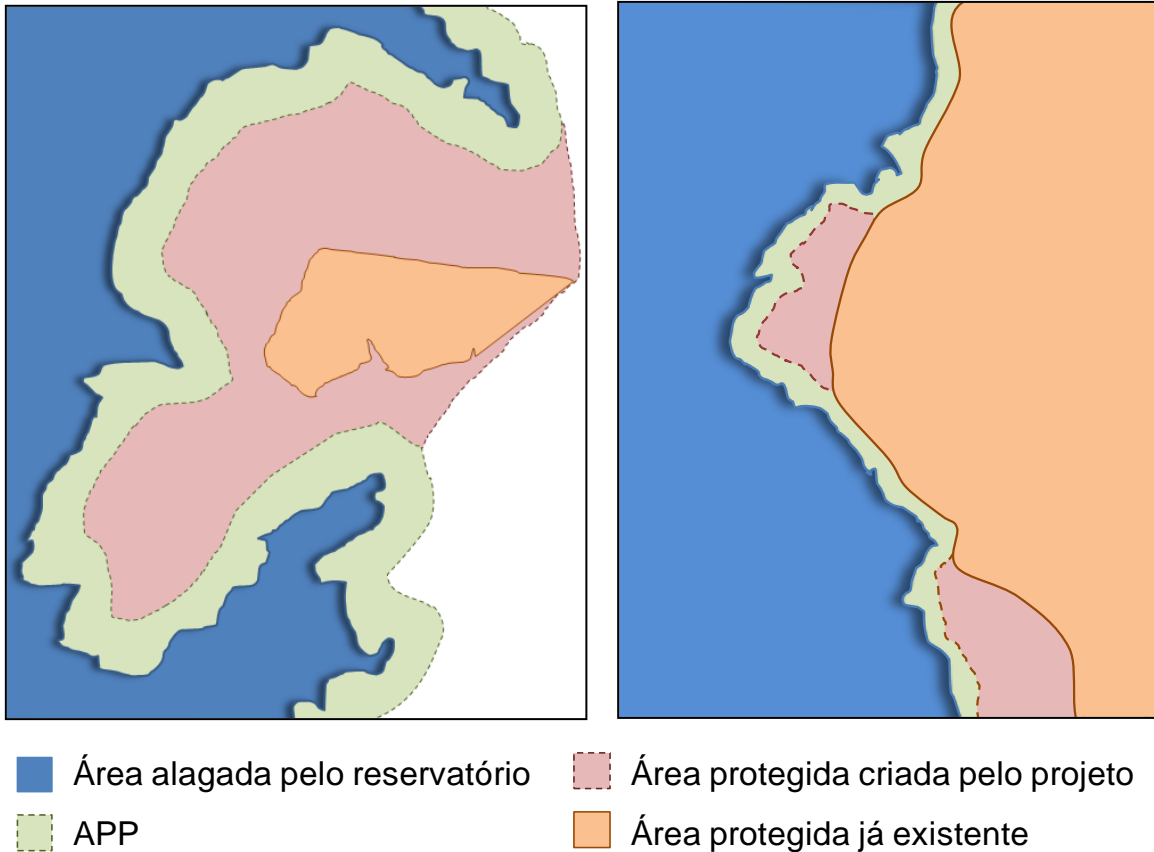


Figura 12: Exemplos de áreas protegidas criadas.

Após a definição das áreas a serem protegidas por projeto (por alternativa), passou-se para o cálculo da área total a ser protegida da alternativa como um todo, que é o somatório das áreas protegidas criadas pelos seus projetos (Tabela 6). O valor de área passível de receber proteção na bacia foi considerado igual a 24000 km². De posse das áreas a serem protegidas de cada alternativa e da área apta a receber proteção na bacia, calculou-se o valor de “Ap”.

Tabela 6: Áreas a serem protegidas por projeto e por alternativa.

Projetos	Área protegida a ser criada por alternativa (km ²)					
	1R	3R	7A	7B	9A	9B
Balsas 1	197	197	197	197	197	197
Balsas 2	32	32	32		32	
Carolina	-	-	1545	1545	1545	1545
Estreito 2	820	820	-	-	-	-
Farinha 1	250	250	-	-	-	-
Farinha 3	-	-	250	250	250	250
Ipueiras	1794	1794	1794	1794	1794	1794
Lageado	685	685	685	685	685	685
Manuel	410	-	410	-	410	-
Natividade 1	1123	-	1123	-	1123	-
Natividade 2	243	243	243	243	243	243
Novo 1	15	15	15	15	15	15
S. Antonio 1	-	1097	-	-	-	-
S. Antonio 145	-	-	-	-	1566	1566
S. Quebrada 132	1148	-	-	-	-	-
S. Quebrada 145	-	-	1630	1630	-	-
Sono 1	95	95	95	95	95	95
Sono 2	77	77	77	-	77	77
Sono 3A	-	-	25	-	25	
Sono 3B	-	-	-	1620	-	1620
Sono 4	87	87	-	-	-	-
Área total (km²)	6976	5392	8121	8074	8057	8087
Ap	0,29	0,22	0,34	0,34	0,34	0,34

Pode-se observar que o somatório das áreas protegidas criadas pelas alternativas 7A, 7B, 9A e 9B é muito próximo, justificado por serem alternativas parecidas. O total de área a ser protegida pelos projetos Manuel e Natividade 1, presentes nas alternativas 7A e 9A, é muito próximo da área a ser protegida pelo projeto Sono 3B, presente na 7B e 9B. O mesmo acontece com as áreas dos projetos Serra Quebrada 2, presente nas alternativas 7A e 7B, e Santo Antônio 2, presente nas alternativas 9A e 9B. Por conta disso, o valor de “Ap” destas alternativas ficou igual, o que resultará em um mesmo valor de benefício ambiental para estas alternativas, não sendo possível distingui-las considerando apenas este critério.

Ressalta-se que nesta aplicação utilizou-se o critério de definir áreas protegidas de pelo menos o tamanho da área alagada pelo reservatório do projeto. Uma possibilidade é

o tamanho da área a ser protegida estar vinculado a um percentual da área alagada do reservatório, como por exemplo, de no mínimo o percentual de áreas prioritárias presentes na área de drenagem da barragem. Seguindo a lógica de que quanto mais áreas prioritárias existir na área de drenagem, maior relevância ambiental tem a região, então, proteger uma área maior trará um maior benefício ambiental para a bacia. Quando este percentual for pequeno, pode indicar que a região não apresenta alta relevância ambiental, de modo que, pode-se tratar de uma região mais desenvolvida, onde a aquisição de terras para criação de áreas protegidas pode não ser uma tarefa simples, podendo ser inviável. Assim, os esforços seriam destinados a áreas realmente relevantes do ponto de vista ecológico.

5.3.2. Cálculo do Índice de Benefício Ambiental

O índice de benefício ambiental de cada alternativa foi calculado conforme Equação 3.10 do item 3.2.

Para a definição dos pesos de cada benefício, nesta aplicação, considerou-se que para a bacia os quatro benefícios tinham importância relativa muito próxima. Porém, de acordo com a Avaliação Ambiental Integrada da Bacia do Rio Tocantins (EPE/CNEC/ARCADIS, 2007), os potenciais conflitos associados aos impactos provocados pela implantação de UHEs na bacia relacionam-se à perda, fragmentação e isolamento de habitats terrestres, pressão sobre ambientes de interesse conservacionista e interferência nas relações socioculturais de populações indígenas. Assim, nesta aplicação, decidiu-se que os benefícios iniciativas de conservação ambiental e fortalecimento e relacionamento permanente com povos indígenas e comunidades tradicionais seriam ligeiramente mais relevantes para a bacia. Conforme já comentado, a definição destes pesos pode ser auxiliada pela utilização de métodos como o AHP.

A intensidade de cada benefício (ci) levou em conta o grau de importância dos locais onde as áreas foram criadas. Para os casos que em um mesmo benefício tivesse locais com diferentes graus de importância, foi feita uma soma ponderada dos graus de importância com as respectivas áreas, de modo a chegar a um valor de intensidade que represente o grau de importância daquele conjunto de áreas. Para o benefício fortalecimento e relacionamento permanente com povos indígenas e comunidades tradicionais considerou-se que as terras indígenas da bacia já estavam com interlocutores formalizados, de tal modo a representar as comunidades, possibilitando que os benefícios

provenientes dos projetos sejam efetivos. Os valores calculados para a alternativa 7A se encontram na Tabela 7 e os benefícios calculados para as alternativas se encontram na Tabela 8, bem como o cálculo do IAP*. Ressalta-se que foram considerados dois conjuntos de pesos para cálculo do IAP*. O primeiro conjunto refere-se à consideração de que os benefícios IAP e BENEf possuem a mesma importância para a bacia refletindo em pesos iguais para os dois índices (igual a 0,5). O segundo conjunto considerou que o benefício ambiental é bem mais importante para a bacia, de modo utilizou-se peso igual a 0,8 para este índice e 0,2 para o IAP.

Tabela 7: Valores para cálculo do Benefício Ambiental da alternativa 7A.

	Benefícios			
	1 (UC)	2 (Uso Sust)	3 (Pesquisa)	4 (Pop indígena)
Intensidade (ci)	0,6	0,8	0,9	0,8
peso (pi)	0,3	0,2	0,2	0,3
ci x pi	0,18	0,16	0,18	0,24
C	0,76			

Tabela 8: Desempenho das alternativas para o Benefício Ambiental.

Alternativas	IAP	BENEf	IAP* (0,5/0,5)	IAP* (0,2/0,8)
7A	0,280	0,780	0,530	0,680
9A	0,310	0,780	0,545	0,686
7B	0,300	0,780	0,540	0,684
1R	0,230	0,750	0,490	0,646
9B	0,340	0,780	0,560	0,692
3R	0,230	0,710	0,470	0,614

A partir da Tabela 8, verifica-se que a inclusão do benefício ambiental não alterou significativamente a ordenação das alternativas neste estudo de caso. A alternativa 9B continuou sendo a melhor alternativa por este critério, porém, em termos de pior alternativa, foi possível diferenciar as alternativas 1R e 3R que estavam empatadas.

Um ponto que chama atenção é o caso da alternativa 7B apresentar o maior impacto socioambiental negativo e, ao mesmo tempo, apresentar o maior benefício. Isso se deve ao critério de escolha das áreas a serem protegidas, que considerou que deveriam ser criadas áreas de pelo menos o tamanho da área alagada dos reservatórios dos projetos da alternativa. Como a alternativa 7B apresenta a maior área alagada dentre todas as

alternativas, seu benefício foi um dos maiores. Por outro lado, uma maior área alagada possivelmente indica uma maior alteração no ambiente, tendo como consequência, um maior impacto socioambiental negativo.

5.4. Abordagem 1: Soma ponderada (ICB, IAN* e IAP*)

5.4.1. Aplicação

Na Tabela 9 são apresentados os índices considerados na análise multiobjetivo dos Estudos Finais do estudo de caso, conforme Tabela 1, incluindo os índices propostos nesta tese calculados nos itens 5.2 (IAN*) e 5.3 (IAP*). Para cada critério foram marcadas em verde as melhores alternativas e em vermelho as piores. Para os critérios ICB e IAN*, quanto menor melhor, e para os critérios IAP e BENEFF quanto maior melhor.

Tabela 9: Desempenho das alternativas.

Alternativas	Energia Firme (MWmed)	Complementação energética (MWmed)	ICB/CUR	IAN	IAN*	IACE	IAP	BENEFF	IAP* (0,5/0,5)	IAP* (0,2/0,8)
7A	2612	104	0,535	0,614	0,612	0,022	0,280	0,780	0,530	0,680
9A	2473	243	0,566	0,609	0,606	0,051	0,310	0,780	0,545	0,686
7B	2716	0	0,543	0,667	0,667	0,000	0,300	0,780	0,540	0,684
1R	2650	66	0,570	0,617	0,616	0,014	0,230	0,750	0,490	0,646
9B	2581	135	0,573	0,658	0,654	0,028	0,340	0,780	0,560	0,692
3R	2510	206	0,611	0,611	0,608	0,043	0,230	0,710	0,470	0,614

Comparando os valores de IAN e IAN*, ou seja, impacto dentro da bacia e o impacto dentro e fora da bacia, não houve alteração em termos de melhores e piores alternativas, o que nem sempre se verifica, principalmente em casos onde as alternativas possuem complementação energética bem distintas, o que não ocorre neste estudo de caso. Como a alternativa 7B aproveita todo o potencial hidrelétrico da bacia, não há complementação energética, então o seu impacto negativo total (IAN*) é igual ao impacto dentro da bacia (IAN). Todas as alternativas deste estudo de caso impactam mais que o impacto representativo da complementação energética (impacto igual a 0,57), o que também, nem sempre ocorre, como exemplificado no item 5.2 com os casos exemplo das bacias do rio Xingu e rio Tibagi. Por conta disso, os valores do IAN* ficaram levemente menores que os

valores de IAN e, como o impacto máximo (da alternativa 7B) não foi alterado, houve um aumento na dispersão dos valores para este critério, o que pode facilitar a ordenação das alternativas, dependendo do método multicritério a ser utilizado. As alternativas 1R e 3R apresentam menor IAP e a 3R apresenta menor benefício ambiental. As alternativas 7A (melhor ICB) e 9A (melhor IAN*) possuem os maiores valores de benefício ambiental, junto com as alternativas 7B (pior IAN*) e 9B.

Utilizando o método da soma ponderada, para a seleção da alternativa preferível foram considerados dez casos, que se diferenciam devido:

- Peso entre os critérios ICB, IAN* e IAP*: foram consideradas duas opções de pesos, a primeira igual ao estudo de caso de referência (0,5 para o ICB e IAN* e 0,17 para o IAP*) e a segunda, alterando apenas o peso do critério IAP*, de modo a permitir a máxima influência deste critério na tomada de decisão conforme orientação do Manual de Inventário, ou seja, peso igual a 0,25;
- Peso entre os índices IAP e BENEFA para formação do índice IAP*: foram consideradas três opções de pesos. A primeira considerando que para a bacia o benefício ambiental e os benefícios socioeconômicos possuem a mesma importância, ou seja, peso igual a 0,5 para os dois índices. A segunda, admitiu-se que os benefícios ambientais eram mais importantes para a bacia do que os socioeconômicos, por se tratar de uma bacia não muito antropizada e com presença de grandes áreas de relevância ambiental, sendo considerados pesos iguais a 0,2 e 0,8 para o impacto socioambiental positivo (socioeconômico) e para o benefício ambiental, respectivamente. A terceira opção buscou avaliar a máxima influência da incorporação do novo critério proposto, o que representa uma bacia muito pouco antropizada e com massiva presença de áreas de relevância ambiental, assim, o IAP* foi calculado considerando peso igual a 1 para o benefício ambiental e 0 para o impacto positivo (socioeconômico); e
- Consideração (ou não) da alternativa AA, conforme discutido no item 3.1, referente ao não aproveitamento do potencial hidroelétrico da bacia. Esta alternativa possui o menor IAN (igual a zero) por não impactar a bacia, IAN* igual ao IAEXP, impacto positivo e benefício ambiental na bacia também nulos e ICB igual a 1 (representando o custo de se gerar toda a energia fora da bacia, ou seja, igual ao CUR), conforme Tabela 10.

Tabela 10: Desempenho da alternativa AA.

Alternativa	ICB/CUR	IAN	IAN*	IAP	BENEF	IAP*
AA	1	0	0,57	0	0	0

A Tabela 11 apresenta resumidamente os pesos utilizados nos dez casos considerados.

Tabela 11: Casos considerados.

Caso	Peso dos critérios					Consideração alternativa AA
	ICB	IAN*	IAP*	BENEF	IAP	
1A	0,5	0,5	0,17	0,5	0,5	NÃO
1B	0,5	0,5	0,17	0,8	0,2	NÃO
1C	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5	NÃO
1D	0,5	0,5	0,25	0,8	0,2	NÃO
1E	0,5	0,5	0,25	1,0	0,0	NÃO
1F	0,5	0,5	0,17	0,5	0,5	SIM
1G	0,5	0,5	0,17	0,8	0,2	SIM
1H	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5	SIM
1I	0,5	0,5	0,25	0,8	0,2	SIM
1J	0,5	0,5	0,25	1,0	0,0	SIM

Vale ressaltar que em todos os casos foram consideradas sempre 6 alternativas, por este ser o limite do número de alternativas da versão disponível do software de um dos métodos utilizados nesta tese. Não sendo esta, uma restrição da formulação do método. Assim, para os casos que consideram a alternativa AA, foi retirada a alternativa 9B, por ser uma alternativa de desempenho ruim frente as demais alternativas. Não foi retirada a pior alternativa, para que, na comparação final de todos os casos, seja possível avaliar se a pior alternativa é sempre a mesma.

5.4.2. Resultados

Os Índices de Preferência Modificado (I') calculados para cada caso para hierarquização das alternativas são apresentados na Tabela 12, sendo selecionada como melhor alternativa aquela que obtiver o menor I' . Na tabela, para cada caso, foi marcada em verde a melhor alternativa e em vermelho a pior. A Figura 13 apresenta a ordenação

das alternativas de maneira esquemática, sendo a primeira linha (em cinza) o resultado do caso referência.

Tabela 12: Valor do Índice de Preferência Modificado das alternativas para o caso referência e para os dez casos considerados.

Altern.	Índice de Preferência Modificado										
	Caso ref.	1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G	1H	1I	1J
7A	0,599	0,556	0,531	0,548	0,510	0,485	0,556	0,531	0,548	0,510	0,485
9A	0,605	0,564	0,540	0,553	0,518	0,494	0,564	0,540	0,553	0,518	0,494
7B	0,621	0,580	0,556	0,569	0,533	0,509	0,580	0,556	0,569	0,533	0,509
1R	0,624	0,579	0,552	0,572	0,533	0,507	0,579	0,552	0,572	0,533	0,507
9B	0,623	0,584	0,561	0,570	0,537	0,515	-	-	-	-	-
3R	0,638	0,596	0,571	0,590	0,554	0,530	0,596	0,571	0,590	0,554	0,530
AA	-	-	-	-	-	-	0,822	0,822	0,839	0,839	0,589

Como pode ser observado, para os dez casos não houve alteração em termos de melhor alternativa, o que indica, que a alternativa 7A é uma excelente alternativa frente as demais, o que pode ser evidenciado por ter o melhor desempenho em termos de ICB e o desempenho em termos de IAN* próximo da melhor alternativa (9A). A pior alternativa alternou entre as alternativas 3R (para os casos que não consideraram a alternativa AA) e a alternativa AA. Esta última, devido seu alto valor para o Índice de Preferência Modificado, configurou-se como uma alternativa muito pior que as demais, ou seja, neste estudo de caso, abrir mão do potencial hidrelétrico da bacia não seria uma boa opção. Apesar da alternativa 9B ter um bom desempenho em termos de benefício (ambiental e socioeconômico), nos casos em que ela foi considerada (casos 1A a 1E), ela foi a segunda pior alternativa, devido, principalmente, ao seu alto impacto socioambiental negativo (IAN*), estando de acordo com a situação desejável, isto é, não se espera beneficiar alternativas ruins em termos de ICB e IAN* (ao mesmo tempo) devido a consideração do benefício. A alternativa 7B, apesar de ser ambientalmente ruim, tem um bom desempenho econômico-energético e de benefício ambiental, o que explica o seu bom posicionamento na ordenação.

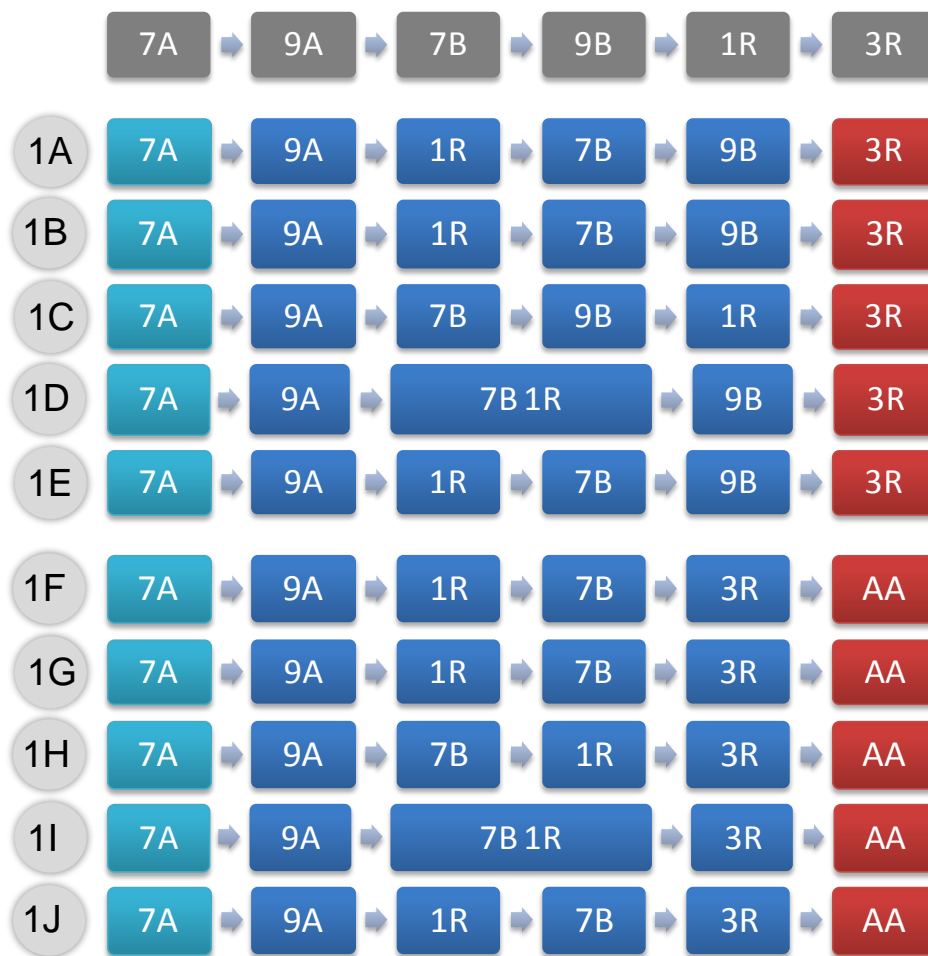


Figura 13: Ordenação das alternativas (casos 1A a 1J).

Adicionalmente, foi realizada uma análise alterando o valor dos pesos dos critérios ICB e IAN* (variando de 0 a 1) e em todas as configurações de peso a alternativa 7A continuou sendo a melhor, evidenciando seu favoritismo como melhor alternativa, sendo este um dos possíveis motivos da não alteração da melhor alternativa após a inclusão dos dois novos critérios. Vale ressaltar que esta não é uma característica comum dos Estudos de Inventário. Apesar da permanência da alternativa 7A como a melhor, verifica-se uma alteração na ordenação das alternativas 1R, 7B e 9B, justificado por já apresentarem no caso referência índices de preferência modificado muito próximos (0,624, 0,621 e 0,623, respectivamente), podendo ser consideradas praticamente empatadas.

5.5. Abordagem 2: Método VIP Analysis (ICB, IAN* e IAP*)

5.5.1. Aplicação

Assim como na abordagem anterior, os critérios considerados para aplicação do VIP na análise multiobjetivo do Estudo de Inventário foram: ICB, IAN* (considerando o impacto fora da bacia) e o IAP* (considerando o benefício ambiental). Os valores dos critérios de cada alternativa foram os mesmos apresentados na Tabela 9 e Tabela 10.

A equação utilizada nos Estudos de Inventário precisou ser levemente modificada de modo a tornar-se uma função aditiva linear, conforme exigência da formulação do VIP. Vale ressaltar que, como o VIP Analysis busca maximizar os critérios e, excetuando-se o IAP, todos os demais critérios do Inventário buscam ser minimizados, foi então utilizado o complemento dos critérios ICB e IAN*, conforme Equação 5.3.

$$V = K_{ICB} \cdot (1 - ICB) + K_{IAN^*} \cdot (1 - IAN^*) + K_{IAP^*} \cdot IAP^* \quad (5.3)$$

Conforme descrito no capítulo 4, o VIP Analysis utiliza como informação a ser fornecida pelo decisor um intervalo de pesos, ao invés de pesos específicos, para cada critério. Para avaliar a influência da consideração dos intervalos de pesos, foram considerados vinte e dois diferentes casos, variando:

- Intervalo de pesos entre os critérios ICB, IAN* e IAP*: foram consideradas cinco opções de intervalos, o primeiro buscando mantê-los próximos daqueles considerados na abordagem 1 (ICB e IAN* com pesos entre 0,4 e 0,5 e IAP* entre 0,1 e 0,2) e os demais intervalos foram ampliando gradativamente as possibilidades dos pesos de cada critério, até o quinto intervalo considerado, onde os pesos dos três critérios poderiam variar de 0 a 1, permitindo todas as possibilidades de pesos.
- Peso entre os benefícios IAP e BENEFA para formação do índice IAP*: foram consideradas duas opções de pesos. A primeira considerando que para a bacia o benefício ambiental e os benefícios socioeconômicos possuem a mesma importância, ou seja, peso igual a 0,5 para os dois benefícios. A segunda, admitiu-se que os benefícios ambientais eram mais importantes para a bacia do que os socioeconômicos, por se tratar de uma bacia não muito antropizada e com presença

de grandes áreas de relevância ambiental, sendo considerados pesos iguais a 0,2 e 0,8 para o impacto socioambiental positivo (socioeconômico) e para o benefício ambiental, respectivamente. É importante destacar, conforme item 4.2, que a utilização dos métodos multicritério propostos na análise multiobjetivo final visa alterar apenas a informação dos pesos dos critérios, não alterando a necessidade de informar os demais pesos intracritérios, como é o caso do peso entre os benefícios IAP e BENEFF; e

- Consideração (ou não) da alternativa AA, conforme discutido no item 3.1, referente ao não aproveitamento do potencial hidroelétrico da bacia.

A Tabela 13 apresenta resumidamente os intervalos pesos utilizados nos casos considerados.

Tabela 13: Intervalo dos pesos.

Caso	Peso dos critérios					Consideração alternativa AA
	ICB	IAN*	IAP*	BENEFF	IAP	
2A	0,4-0,5	0,4-0,5	0,1-0,2	0,5	0,5	NÃO
2B	0,4-0,6	0,4-0,6	0-0,25	0,5	0,5	NÃO
2C	0,3-0,7	0,3-0,7	0-0,25	0,5	0,5	NÃO
2D	0-1	0-1	0-0,25	0,5	0,5	NÃO
2E	0-1	0-1	0-1	0,5	0,5	NÃO
2F	0,4-0,5	0,4-0,5	0,1-0,2	0,8	0,2	NÃO
2G	0,4-0,6	0,4-0,6	0-0,25	0,8	0,2	NÃO
2H	0,3-0,7	0,3-0,7	0-0,25	0,8	0,2	NÃO
2I	0-1	0-1	0-0,25	0,8	0,2	NÃO
2J	0-1	0-1	0-1	0,8	0,2	NÃO
2K	0,4-0,5	0,4-0,5	0,1-0,2	0,5	0,5	SIM
2L	0,4-0,6	0,4-0,6	0-0,25	0,5	0,5	SIM
2M	0,3-0,7	0,3-0,7	0-0,25	0,5	0,5	SIM
2N	0-1	0-1	0-0,25	0,5	0,5	SIM
2O	0-1	0-1	0-1	0,5	0,5	SIM
2P	0,4-0,5	0,4-0,5	0,1-0,2	0,8	0,2	SIM
2Q	0,4-0,6	0,4-0,6	0-0,25	0,8	0,2	SIM
2R	0,3-0,7	0,3-0,7	0-0,25	0,8	0,2	SIM
2S	0-1	0-1	0-0,25	0,8	0,2	SIM
2T	0-1	0-1	0-1	0,8	0,2	SIM
2U	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,8	0,2	NÃO
2V	0,2-0,5	0,2-0,5	0,2-0,5	0,8	0,2	NÃO

Além dos intervalos dos pesos, foi informado também como dado de entrada quatro restrições: a soma dos pesos dos três critérios tem que ser igual a um e os pesos dos três critérios tem que ser maiores ou iguais a zero.

Vale ressaltar que o VIP é um método utilizado para escolha da alternativa preferível, a partir de um processo interativo em que as alternativas menos preferíveis vão sendo eliminadas até sobrar apenas uma, que será a escolhida como melhor alternativa. Esta utilização em Estudos de Inventário é suficiente para escolha da melhor alternativa. Porém, considerou-se pertinente, nesta tese, para uma melhor avaliação da performance dos métodos propostos e comparação dos resultados, obter uma “ordenação” das alternativas da mais preferível até a menos preferível. Assim, para cada caso, utilizou-se o VIP para a escolha da alternativa preferível dentre o conjunto de alternativas analisadas. Em seguida, foi identificada qual seria a alternativa preferível caso a alternativa selecionada anteriormente não existisse no conjunto de alternativas. Sendo utilizado novamente o VIP para este novo conjunto de alternativas. Este processo se repetiu identificando a alternativa preferível e admitindo que ela não existisse no próximo conjunto de alternativas, até restar um conjunto de apenas duas alternativas. Para efeito de comparação dos métodos, no caso do VIP, considere o resultado das alternativas mais preferíveis em cada subconjunto de alternativas como uma forma de “ordenação” das alternativas.

5.5.2. Resultados

A Figura 14 apresenta a ordenação das alternativas de maneira esquemática para os casos que não consideraram a alternativa AA, sendo a primeira linha (em cinza) o resultado do caso referência. Os casos 2a a 2J consideraram intervalos de pesos diferentes para os critérios e os casos 2U e 2V consideraram os mesmos intervalos de pesos para os três critérios.



Figura 14: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos 2A a 2J e 2U a 2V).

A partir da Figura 14, observa-se que a melhor alternativa para praticamente todos os casos foi a 7A (igual ao resultado do estudo de referência) com forte dominância desta alternativa em relação às demais. A Tabela 14 apresenta as informações do caso 2A, indicando para cada alternativa os valores mínimo (MIN) e máximo (MAX) que a função V pode assumir dado o intervalo de pesos considerados, o máximo arrependimento (*Max Regret*) e se a melhor alternativa (no caso a 7A) domina (DOM) as demais alternativas ou se domina em absoluto (alternativa ótima), isto é, se o valor mínimo da função da melhor alternativa é superior ao máximo valor que a outra alternativa pode assumir. Observa-se pela tabela, que a alternativa 7A domina todas as demais alternativas e só não domina em

absoluto a alternativa 9A. O valor negativo para o *Max Regret* já indica que a alternativa 7A é a alternativa ótima.

Tabela 14: Resumo dos resultados do VIP para o caso 2A.

Alternativa	MIN	MAX	MAX REGRET	DOM
1R	0,413	0,424	0,024	SIM (ABS)
3R	0,398	0,406	0,042	SIM (ABS)
7A	0,433	0,447	-0,007	
7B	0,403	0,424	0,030	SIM (ABS)
9A	0,425	0,44	0,012	SIM
9B	0,400	0,421	0,033	SIM (ABS)

Os resultados dos casos 2A, 2B e 2C são idênticos, ou seja, não houve alteração na ordenação das alternativas com o aumento do intervalo dos pesos de [0,4 a 0,5] para [0,3 a 0,7] para os critérios ICB e IAN* e de [0,1 a 0,2] para [0 a 0,25] para o critério IAP*. O mesmo ocorre nos casos 2F, 2G e 2H, tendo apenas a diferença de empate em termos de pior alternativa no caso 2G. A ordenação dos casos 2C, 2D e 2E, assim como nos casos 2H, 2I e 2J, difere pelo ranking da alternativa 9B, que da penúltima posição (casos 2A a 2C) passa para a terceira posição (caso 2E). Vale ressaltar que as duas alternativas mais preferíveis (7A e 9A) são as mesmas em todos os casos. As diferenças de ordenação ocorrem a partir da terceira colocada.

Na Tabela 15 é apresentada a matriz de confrontação para os casos 2D e 2E, onde são calculados para cada par de alternativas, a maior diferença da função V considerando uma mesma configuração de pesos k, que obedecem o intervalo de pesos definido, sendo o *Max Regret* de uma alternativa o máximo deste valor quando comparado com todas as demais alternativas. Os valores desta tabela foram obtidos pelo VIP considerando que as alternativas 7A e 9A não faziam parte do conjunto de alternativas, para entender a troca da terceira melhor posição da 1R para a 9B. No caso 2D, a alternativa indicada como preferível considerando o conjunto de alternativas 1R, 3R, 7B e 9B é a 1R por apresentar o menor *Max Regret* (0,033). Este valor de *Max Regret* foi obtido pela diferença da função V entre as alternativas 7B e 1R considerando peso igual a 0,75 para o ICB e 0,25 para IAP*. No caso 2E, o intervalo de pesos permitir peso igual a 1 para o critério IAP*, garantiu à alternativa 9B o menor *Max Regret* (0,046) em relação as demais alternativas, uma vez que aumentou o *Max Regret* da alternativa 1R (que passou de 0,033 para 0,070), obtido

considerando peso igual a 1 para o critério IAP*, quando comparado com a alternativa 9B. Na tabela também estão indicados os pesos utilizados para os valores que sofreram alteração do caso 2D para o caso 2E.

Tabela 15: Matriz de confrontação dos casos 2D e 2E.

Alternativas	CASO 2D				CASO 2E			
	1R	3R	7B	9B	1R	3R	7B	9B
1R	-	0,041	0,051	0,038	-	0,041	0,051	0,038
3R	0,008	-	0,059	0,046	0,008	-	0,059	0,046
7B	0,033*	0,068*	-	0,030	0,05***	0,07***	-	0,030
9B	0,015*	0,051*	0,015**	-	0,07***	0,09***	0,02***	-
MaxRegret	0,033	0,068	0,059	0,046	0,070	0,090	0,059	0,046

Obs: * K = (0,75; 0; 0,25) ** K = (0; 0,75; 0,25) *** K = (0; 0; 1)

Além disso, observa-se pela Tabela 16 que a alternativa 7A nos casos 2D e 2E, quando todas as alternativas estavam sendo analisadas, apesar de ainda ser a melhor, não é mais a alternativa ótima e não apresenta tanta dominância em relação as demais alternativas, quanto no caso 2A, onde apresentou *Max Regret* negativo.

Tabela 16: Resumo dos resultados do VIP para os casos 2D e 2E.

Alternativas	CASO 2D				CASO 2E			
	MIN	MAX	MAX REGRET	DOM	MIN	MAX	MAX REGRET	DOM
1R	0,384	0,445	0,036	SIM	0,384	0,49	0,07	SIM
3R	0,389	0,412	0,076	SIM	0,389	0,47	0,09	SIM
7A	0,388	0,481	0,008		0,388	0,53	0,03	
7B	0,333	0,478	0,061	SIM	0,333	0,54	0,061	
9A	0,394*	0,462	0,031		0,394*	0,545	0,031	
9B	0,346	0,46	0,048	SIM	0,346	0,56	0,048	

Obs: * Valor obtido considerando peso = 1 para critério IAN*

Os casos 2U e 2V que considerou mesmo intervalo de pesos para os três critérios, não apresentaram diferença de ordenação entre si, mas diferiram dos demais casos do VIP, principalmente em termos da posição da alternativa 1R, considerada nestes dois casos como segunda pior alternativa e, em geral, nos casos anteriores, era considerada como terceira melhor alternativa, alterando assim a ordenação também das alternativas 7B e 9B, que, em geral, eram sempre piores que a 1R. De todos os casos executados do VIP, estes

dois casos foram os que mais se aproximaram da ordenação obtida pela soma ponderada, uma vez que não houve divergência.

Vale salientar, que os intervalos de pesos informados nestes dois casos permitiram que fossem considerados pesos iguais para os três critérios. Como no caso dos Estudos de Inventário, existe uma diferença em termos de importância dos critérios, é importante que os tomadores de decisão considerem esta informação quando forem inserir os intervalos de pesos no método. Outra maneira de informar no VIP a importância, ao invés de limitar pelo intervalo de pesos, é considerar restrições quanto aos pesos considerados. Assim, para exemplificar, foi executado o caso 2X, que considerou o mesmo intervalo de pesos do caso 2V, ou seja, sem diferença de importância entre os critérios, mas foram incluídas duas restrições adicionais (equações 5.4 e 5.5), de modo a garantir que durante as análises do VIP, o peso dos critérios ICB e IAN* fossem sempre maiores que o peso do IAP*.

$$p_{icb} \geq p_{iap*} + \varepsilon \tag{5.4}$$

$$p_{ian*} \geq p_{iap*} + \varepsilon \tag{5.5}$$

Sendo: $\varepsilon = 0,02$

A Figura 15 apresenta o resultado da ordenação do caso referência (em cinza) e dos casos 2V e 2X, para fins de comparação. Observa-se que incluir restrições de pesos no caso 2X fez com que a ordenação das alternativas ficasse diferente do caso 2V e igual aos resultados dos casos anteriores (casos 2A a 2C e 2F a 2H), onde o peso do critério IAP* foi limitado pelo intervalo dos pesos, indicando que o método é sensível quando são informadas a importância dos critérios, seja pela limitação dos intervalos dos pesos ou pelas restrições.

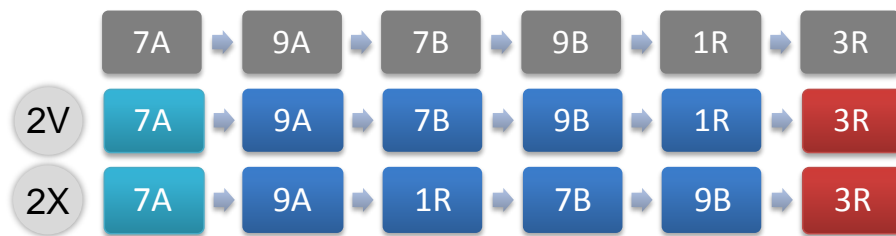


Figura 15: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos 2V e 2X).

Na Figura 16 são apresentados os resultados dos casos 2K ao 2T, que são similares aos casos 2A ao 2J, com substituição da alternativa 9B pela alternativa AA.

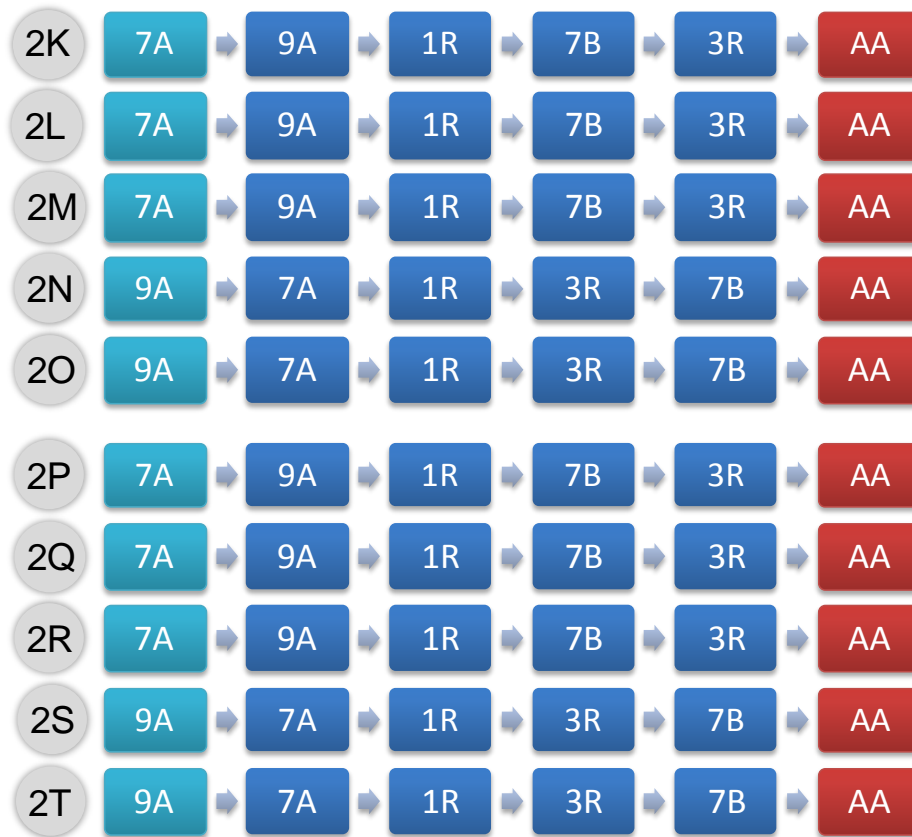


Figura 16: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos 2K a 2T).

A partir destes resultados, verifica-se que os casos 2K ao 2M e 2P ao 2R indicam a alternativa 7A como a melhor, com forte dominância. Estes casos possuíam intervalos de pesos menores, ficando mais próximos dos pesos do caso referência (item 5.1). Além disso, os intervalos destes seis casos impossibilitavam resultados pautados em apenas um critério (como nos casos em que o intervalo admite peso igual a zero ou igual a um para um dos critérios). Nos casos 2N, 2O, 2S e 2T, a melhor alternativa selecionada foi a 9A, em consequência, principalmente, dos intervalos dos pesos admitirem peso igual a zero ou um para um dos critérios, permitindo que o resultado considerasse apenas um critério, que no caso foi o IAN*. Em ambos os casos, a alternativa 7A é a segunda melhor alternativa.

Além disso, o resultado muito semelhante entre os casos 2N e 2O e 2S e 2T, indica que o critério IAP* não está sendo decisivo na escolha da melhor alternativa, pois

aumentando o valor máximo do intervalo de seu peso (de 0,25 para 1,0) o resultado não apresentou alterações. Em geral, os maiores *Max Regrets* das alternativas foram obtidos nas comparações das alternativas com a alternativa AA e considerando peso igual a um para o critério IAN*. Isto é evidenciado, comparando a ordenação dos pares de casos 2D com 2N e também 2E com 2O, por se tratarem de casos similares cuja diferença está na substituição da alternativa 9B (presente nos casos 2D e 2E) pela AA (presente nos casos 2N e 2O). Em todos os casos, a alternativa AA foi a pior, indicando que é relevante explorar o potencial hidrelétrico da bacia.

Finalmente, a partir de todos os casos executados utilizando o VIP para seleção da alternativa preferível do estudo de inventário do estudo de caso, pode-se concluir que a alternativa 7A é claramente a melhor alternativa e há indicações de que a alternativa 9A mereceria ser estudada caso por algum motivo a alternativa 7A não pudesse ser implementada.

5.5.3. Caso representativo

Para facilitar as análises e comparações entre os diversos métodos, podemos considerar como um resultado representativo do método VIP o obtido no caso 2C e como o resultado mais próximo da soma ponderada o caso 2V. Salienta-se que no caso do VIP que teve resultado mais próximo do caso referência, não foi informada nenhuma preferência entre critérios.

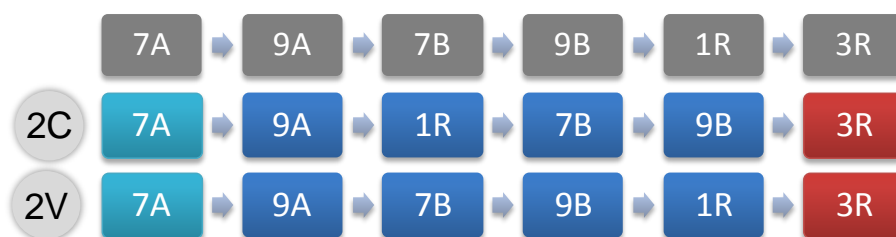


Figura 17: Ordenação das alternativas, segundo VIP Analysis (casos representativos).

5.5.4. Conclusões

Em geral, os resultados do VIP foram próximos do resultado do Estudo de Inventário, principalmente em termos de melhor e pior alternativa. Porém, observou-se que utilizar

como intervalo de pesos o máximo possível (entre 0 e 1), possibilita que o modelo considere peso igual a zero para um dos critérios, o que seria equivalente a descartar o critério da análise, ou considere valor igual a um para um dos pesos, o que significa solucionar o problema considerando apenas um critério, o que não seria desejável na análise multiobjetivo dos Estudos de Inventário.

Além disso, observou-se que o VIP é sensível quando é informada preferência entre critérios seja através dos intervalos dos pesos ou das restrições lineares. Diferentemente do método da soma ponderada, que é necessário informar especificamente o quanto um critério é preferível ao outro, no VIP, informa-se um intervalo que indica os valores de peso que cada critério pode assumir durante as análises. Na maioria dos casos considerados, estes intervalos já indicavam uma importância maior para os critérios ICB e IAN*, pois não era permitido o critério IAP* assumir peso maior. Caso não seja possível informar esta preferência nos intervalos de pesos, ou seja, nos casos que o limite máximo do peso de um critério de menor importância for superior ao limite mínimo do critério de maior importância, o VIP ainda permite informar restrições quanto aos pesos considerados. Além das restrições de “>=” ou “<=”, o VIP também permite restrições de igualdade, para os casos, que se deseje, por exemplo, que os pesos dos critérios ICB e IAN* sejam sempre iguais durante a análise. Ou seja, o decisor tem meios de considerar no método as limitações ou preferências, o que permite realizar uma análise de consistência do caso.

De toda forma, os resultados das aplicações mostraram que o VIP Analysis é uma ferramenta interessante e muito promissora a ser utilizada nos Estudos de Inventário, uma vez que, identifica a melhor alternativa de divisão de quedas sem necessitar da informação de valores precisos dos pesos entre os critérios, e, assim, a tomada de decisão é realizada considerando uma faixa de pesos, o que dá uma maior segurança na escolha da alternativa. Vale salientar, que o VIP é um método interativo, para que os tomadores de decisão possam aprender sobre o problema durante o processo de tomada de decisão. Então, a decisão quanto a melhor alternativa é tomada considerando uma gama de informações, tais como o desempenho das alternativas frente a seus valores mínimos e máximos para a função, a diferença de desempenho das alternativas para a função considerando diferentes configurações de pesos, e ainda possibilita a eliminação progressiva de alternativas menos satisfatórias, propiciando novas fases sucessivas de cálculo, na busca da alternativa preferível. Esta é uma das vantagens deste método em relação à soma ponderada, uma

vez que a própria metodologia de escolha da alternativa preferível do VIP já permite buscar uma alternativa mais robusta. Deve-se observar que o Manual de Inventário recomenda procurar a alternativa mais robusta, no entanto, com o método da soma ponderada, essa análise é feita apenas testando diferentes conjuntos de pesos, sem ter uma metodologia formal como base. Em vez disso, o VIP é um método com procedimento estruturado e orientado para o aprendizado, que fornece várias ferramentas, permitindo restringir os pesos viáveis, apenas estabelecendo as restrições lineares que o decisor sente confortável e, em seguida, buscar conclusões robustas nessas condições.

5.6. Abordagem 3: ELECTRE III (ICB, IAN* e IAP*)

5.6.1. Aplicação

Assim como nas abordagens anteriores, os critérios considerados para aplicação do ELECTRE III na análise multiobjetivo final do Estudo de Inventário foram: ICB, IAN* (considerando o impacto fora da bacia) e o IAP* (considerando o benefício ambiental). Os valores dos critérios de cada alternativa foram os mesmos apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10.

Conforme descrito no capítulo 4, o ELECTRE III utiliza como informações a serem fornecidas pelo decisor os parâmetros de preferência e indiferença para cada critério e a importância entre os critérios. Para a definição dos valores destes parâmetros, de forma que pudesse ser adotada uma mesma métrica para os três critérios e considerando que estes podem apresentar níveis diferentes de variabilidade, foi adotado o desvio-padrão (DP), que é uma medida do quão disperso são os valores de um critério, conforme MOREIRA (2007). Primeiramente, antes de verificar a influência da alternativa AA, foram considerados doze diferentes casos, variando:

- Parâmetros de preferência e indiferença dos critérios ICB, IAN* e IAP*: foram consideradas duas opções de parâmetros. As duas opções foram: (i) 2DP (indiferença) e 3DP (preferência) e (ii) 1DP (indiferença) e 2DP (preferência). Em outras palavras, para a primeira opção, serão consideradas indiferentes as alternativas cuja diferença de desempenho entre elas para um determinado critério for inferior a dois desvios-padrão dos desempenhos das alternativas nesse mesmo

critério e uma alternativa será considerada estritamente preferível a outra quando a diferença de desempenho entre estas duas alternativas, para um determinado critério, for superior a três desvios-padrão dos desempenhos das alternativas nesse mesmo critério;

- Peso entre os benefícios IAP e BENEf para formação do índice IAP*: foram consideradas as mesmas duas opções de pesos adotadas na aplicação do método anterior (VIP Analysis). A primeira considerando peso igual a 0,5 para os dois benefícios e a segunda, pesos iguais a 0,2 para o IAP e 0,8 para BENEf; e
- Importância dos critérios ICB, IAN* e IAP*, de modo a diferenciar a importância dos critérios no processo de ordenação das alternativas. Foram consideradas três opções: a primeira considerando ICB e IAN* com mesma importância (igual a 1) e IAP* com menor importância (igual a 0,25), a segunda aumentando a importância do IAP* (igual a 0,5) e a terceira em que todos os critérios tem a mesma importância (igual a 1). Conforme ressaltado anteriormente, estes pesos não refletem *trade-off* entre os critérios, diferentemente da primeira abordagem que aplicou o método da soma ponderada, que é um método compensatório e estes pesos refletem uma taxa de substituição. Por conta disso, os valores numéricos das duas abordagens não são os mesmos.

A Tabela 17 apresenta resumidamente as informações utilizadas nos 12 primeiros casos do ELECTRE III.

Tabela 17: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3A a 3L).

Caso	Peso dos critérios					Parâmetros	
	ICB	IAN*	IAP*	BENEf	IAP	Indiferença	preferência
3A	1	1	0,25	0,5	0,5	2 DP	3 DP
3B	1	1	0,50	0,5	0,5	2 DP	3 DP
3C	1	1	1	0,5	0,5	2 DP	3 DP
3D	1	1	0,25	0,5	0,5	1 DP	2 DP
3E	1	1	0,50	0,5	0,5	1 DP	2 DP
3F	1	1	1	0,5	0,5	1 DP	2 DP
3G	1	1	0,25	0,8	0,2	2 DP	3 DP
3H	1	1	0,50	0,8	0,2	2 DP	3 DP
3I	1	1	1	0,8	0,2	2 DP	3 DP
3J	1	1	0,25	0,8	0,2	1 DP	2 DP
3K	1	1	0,50	0,8	0,2	1 DP	2 DP

Caso	Peso dos critérios					Parâmetros	
	ICB	IAN*	IAP*	BENEF	IAP	Indiferença	preferência
3L	1	1	1	0,8	0,2	1 DP	2 DP
DP	0,03	0,02	0,03	-	-	-	-

Vale ressaltar que, assim como no VIP, na utilização do ELECTRE III, os desempenhos das alternativas foram informados considerando como direção de preferência a maximização dos critérios, assim, foram inseridos os valores complementares dos critérios ICB e IAN* e o próprio valor do IAP*.

5.6.2. Resultados

A Figura 18 esquematiza o resultado da ordenação das alternativas dos casos 3A a 3F, onde o IAP* foi calculado considerando mesmo peso para o BENEFF e IAP, e a Figura 19 os resultados dos casos 3G a 3L, onde o IAP* foi calculado admitindo maior peso para o BENEFF em relação ao IAP.

A partir dos primeiros resultados pode-se concluir, como esperado, que, à medida que se diminuem os valores dos parâmetros de indiferença e preferência, mais dispersa fica a ordenação das alternativas, ou seja, diminuem os casos de empates entre alternativas. Isto pode ser verificado, principalmente, no maior número de posições na ordenação dos casos 3D a 3F (que utilizaram os pares de parâmetros 1DP e 2DP) comparado aos casos 3A a 3C, e o menor número de empates, principalmente na segunda posição dos casos que utilizaram parâmetros maiores. Observa-se que, neste estudo de caso, utilizar parâmetros menores conseguiu diferenciar melhor as alternativas 1R e 9B (no caso 3D); 1R, 9B, 7B e 9A (no caso 2E), mas com isso acabou aproximando (empatando) as alternativas 7A e 9A e também as alternativas 3R e 7B. No caso 3F, o desempate das alternativas 1R, 9B e 7B acabou gerando uma incomparabilidade entre as alternativas 1R e 7B, isto é, não foi possível identificar qual das duas é melhor ou pior entre si, mas ambas são piores que a 9B e melhores que a 3R. Em todos os casos a alternativa 7A aparece como melhor alternativa, sendo que, nos casos com parâmetros menos restritivos, ela aparece empatada ora com a 9A ora com a 9B, e restringindo os parâmetros, a 7A passa a empatar somente com a alternativa 9A. Ressalta-se que, nos casos utilizando o VIP e a soma ponderada, esta alternativa aparecia também como uma boa alternativa, em geral,

como segunda melhor alternativa. Em termos de pior alternativa, todos os casos indicaram a 3R, algumas vezes empatada com a alternativa 7B.

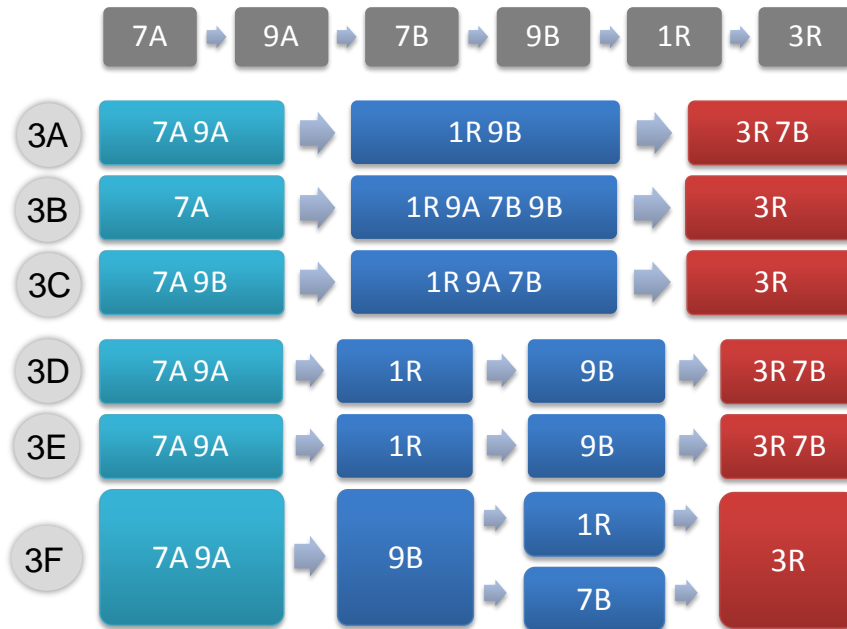


Figura 18: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3A a 3F).

Quanto ao aumento da importância do critério IAP*, verifica-se que beneficiou as alternativas 9B e 7B, prejudicando a alternativa 1R. Isso demonstra que o método é sensível a influência do peso dos critérios.



Figura 19: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3G ao 3L).

As mesmas considerações feitas para os casos 3A a 3F podem ser feitas para os casos 3G a 3L. Houve um aumento no número de posições na ordenação e conseqüentemente diminuição das repetições com a diminuição dos valores dos parâmetros. Com a diminuição dos parâmetros, foi possível diferenciar melhor as alternativas 1R, 9A e 9B, que em geral apareciam empatadas nos casos 3G a 3I, e nos casos 3J a 3L já aparecem ocupando posições diferentes. Em termos de melhor alternativa a 7A foi a melhor em todos os casos, empatada na maioria com a 9A. Nos três primeiros casos a alternativa 3R foi a pior e restringindo os parâmetros, a alternativa 7B passou a empatar como pior alternativa.

Como conclusão, verificou-se que utilizar valores altos para os parâmetros de indiferença e preferência não é interessante para Estudos de Inventário, com o intuito de se evitar empates entre alternativas, e, assim, nas próximas aplicações adotou-se apenas uma opção de parâmetro (1DP e 2DP). Ressalta-se que, é importante que os parâmetros reflitam as preferências e indiferenças do decisor, de modo que, quando ocorrer empate entre alternativas, esta ser uma informação relevante para a tomada de decisão, mesmo que depois sejam feitos “ajustes” nos parâmetros para tentar exprimir a ordenação total das alternativas.

Além disso, os próximos casos consideraram a alternativa AA (e não consideraram a alternativa 9B). A Tabela 18 apresenta as informações utilizadas e a Figura 20 esquematiza o resultado. Ressalta-se que os resultados dos casos com peso do benefício igual a 0,8 e do IAP igual a 0,2 para cálculo do IAP* foram idênticos aos dos pesos iguais a 0,5 e por isso não constam na Tabela 18: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3N a 3P). e nem na Figura 20.

Tabela 18: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3N a 3P).

Caso	Peso dos critérios					Parâmetros	
	ICB	IAN*	IAP*	BENEF	IAP	Indiferença	preferência
3N	1	1	0,25	0,5	0,5	1 DP	2 DP
3O	1	1	0,50	0,5	0,5	1 DP	2 DP
3P	1	1	1	0,5	0,5	1 DP	2 DP
DP	0,18	0,03	0,21	-	-	-	-

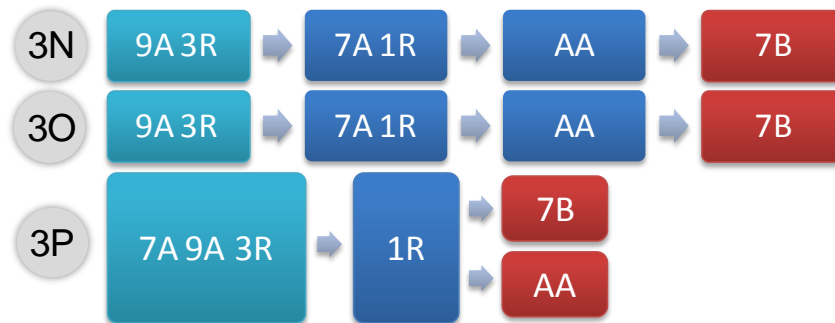


Figura 20: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3N a 3P).

Nestes primeiros resultados houve uma alteração em termos de melhor alternativa. Até então, a melhor alternativa era sempre a 7A e, nestes casos, a melhor alternativa ficou empatado entre a 9A e 3R (a 7A só apareceu, também empatada, no caso 3P), assim, em termos de tomada de decisão, tanto faz escolher a alternativa 9A ou 3R (casos 3N e 3O). Nestes casos ocorreu empate também na segunda melhor posição entre duas alternativas. A pior alternativa, que em geral era a 3R, também foi alterada para a alternativa 7B, e no caso 3P, houve incomparabilidade desta alternativa com a alternativa AA, apesar de ambas serem as piores.

Como pode ser observado, houve uma grande quantidade de empates, devido a inclusão da alternativa AA, que possui desempenho, em especial para os critérios ICB e IAP*, muito dispare das demais alternativas. Esta grande diferença no desempenho resulta em um desvio-padrão alto, tendo como consequência, valores altos para os parâmetros de indiferença e preferência, o que prejudica a diferenciação das alternativas. Nestes casos, a utilização do desvio-padrão pode não ser o mais indicado. Entretanto, para viabilizar esta diferenciação e ainda utilizar a métrica de desvio-padrão, algumas soluções podem ser empregadas, buscando diminuir os valores dos parâmetros de indiferença e preferência. Ressalta-se que esta dificuldade na diferenciação das alternativas se deve a apenas uma alternativa apresentar esta discrepância. Apesar de nesta aplicação estarmos tratando exclusivamente da introdução da alternativa AA, que é uma alternativa muito dispare das demais, as observações relativas a esta alternativa também são pertinentes a Estudos de Inventário que por ventura tenham alguma alternativa muito distinta das demais, sem necessariamente ser a alternativa AA, que poderão resultar no mesmo comportamento do processo decisório devido ao método empregado.

Como neste caso existe apenas uma alternativa (AA) que aumenta consideravelmente o desvio-padrão (pois tem um desempenho muito dispare das demais alternativas), sugere-se primeiramente calcular um novo desvio-padrão desconsiderando esta alternativa, e assim, obter novos parâmetros de indiferença e preferência (casos 3Q a 3S).

Tabela 19: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3Q a 3S).

Caso	Peso dos critérios					Parâmetros	
	ICB	IAN*	IAP*	BENEF	IAP	Indiferença	Preferência
3Q	1	1	0,25	0,5	0,5	1 DP*	2 DP*
3R	1	1	0,50	0,5	0,5	1 DP*	2 DP*
3S	1	1	1	0,5	0,5	1 DP*	2 DP*
DP* (sem AA)	0,03	0,03	0,03	-	-	-	-

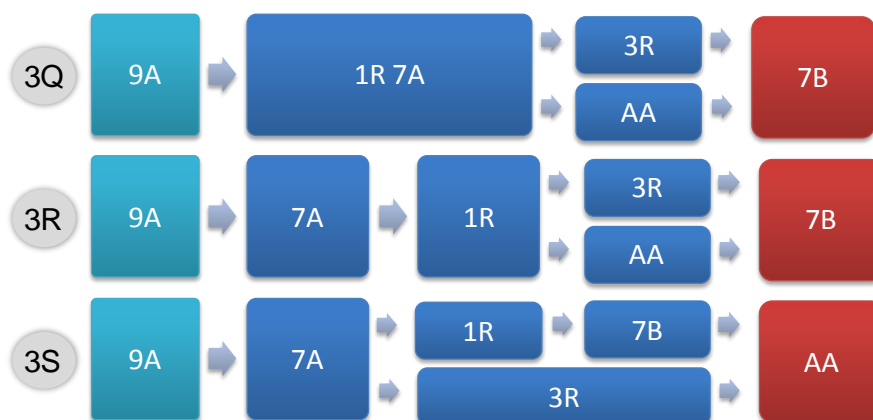


Figura 21: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3Q a 3S).

Nestes casos, percebe-se uma diminuição nos empates, apesar de ocorrerem incomparabilidades entre alternativas, isto é, no caso 3Q e 3R não foi possível definir dentre as alternativas 3R e AA, qual delas é melhor, embora, ambas sejam melhores que a 7B e piores que as demais. Quanto às alternativas 1R e 7A, no caso 3Q, foi o único empate que aconteceu, sendo indiferente a escolha de uma ou outra. Já no caso 3R este empate não ocorre, uma vez que, como visto anteriormente, aumentar a importância do critério IAP*, prejudica a alternativa 1R, piorando sua posição na ordenação. No caso 3S, não foi possível definir se a 3R é melhor ou pior que a 7B e 1R, mas as três são melhores que a alternativa AA, que ficou como pior alternativa, dado que seu desempenho no critério IAP* é ruim e neste caso, aumentou-se a importância deste critério.

É interessante observar que, com exceção do último caso, todas as demais incomparabilidades ocorrem com a alternativa AA, que realmente é uma alternativa atípica frente às demais.

Uma segunda opção para viabilizar a diferenciação das alternativas é reduzir gradativamente os valores dos parâmetros de indiferença e preferência até que o resultado da ordenação seja satisfatório e se obtenha parâmetros que reflitam a real preferência e indiferença do decisor. Utilizando o caso 3N como referência, os parâmetros foram divididos pela metade até obter resultados desejáveis (casos 3T a 3V), ou seja, conseguir diferenciar as alternativas.

Tabela 20: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3T a 3V).

Caso	Peso dos critérios					Parâmetros	
	ICB	IAN*	IAP*	BENEF	IAP	Indiferença	preferência
3T	1	1	0,25	0,5	0,5	0,5 DP	1 DP
3U	1	1	0,25	0,5	0,5	0,25 DP	0,5 DP
3V*	1	1	0,25	0,5	0,5	0,125 DP	0,25 DP
DP (com AA)	0,18	0,03	0,21	-	-	-	-

Obs: Como a precisão mínima do ELECTRE para os parâmetros é de apenas duas casas decimais e o valor de 0,125DP do critério IAN ficaria menor que 0,01, apenas para este critério, no caso 3V, utilizou-se os mesmos parâmetros do caso 3U (0,25DP e 0,50DP).

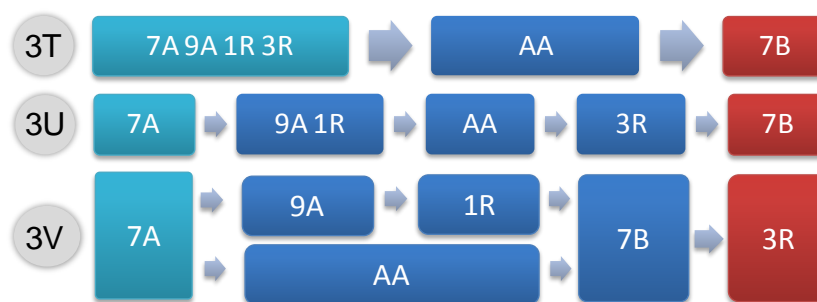


Figura 22: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3T a 3V).

Pelos resultados da Figura 22, verifica-se que foram necessárias três reduções dos parâmetros para que não houvesse empate. Na primeira redução dos parâmetros (caso 3T), quatro alternativas ficaram empatadas e com a diminuição dos parâmetros foi possível diferenciar estas alternativas, num primeiro momento (caso 3U), diferenciando as alternativas 9A e 1R das alternativas 7A, considerada melhor, e 3R, considerada a pior das

quatro, e, num segundo momento (caso 3V), diferenciando as alternativas 9A e 1R. Com a diminuição dos parâmetros, a alternativa AA, que aparecia pior que as alternativas 9A e 1R, no caso 3V apareceu como incomparável a estas duas alternativas. A alternativa 7B foi considerada como a pior alternativa em todos os casos (exceto no caso 3V que ficou em penúltimo).

Sobre a alteração na ordenação das alternativas 7B e 3R, no caso 3U, em termos de ICB e IAP*, a alternativa 7B tem uma preferência fraca em relação a 3R, isto é, a diferença de desempenho destas alternativas nestes critérios é superior ao parâmetro de indiferença e inferior ao parâmetro de preferência, tendo a alternativa 7B desempenho melhor que a 3R. Em termos de IAN*, a 3R tem preferência estrita em relação a 7B, o que acabou prevalecendo na ordenação. Com a diminuição dos parâmetros (caso 3V), a preferência fraca da alternativa 7B em relação a 3R para os critérios ICB e IAP* virou preferência estrita, e manteve-se a preferência estrita da 3R em relação a 7B no critério IAN*, alterando a ordenação (vide Figura 23).

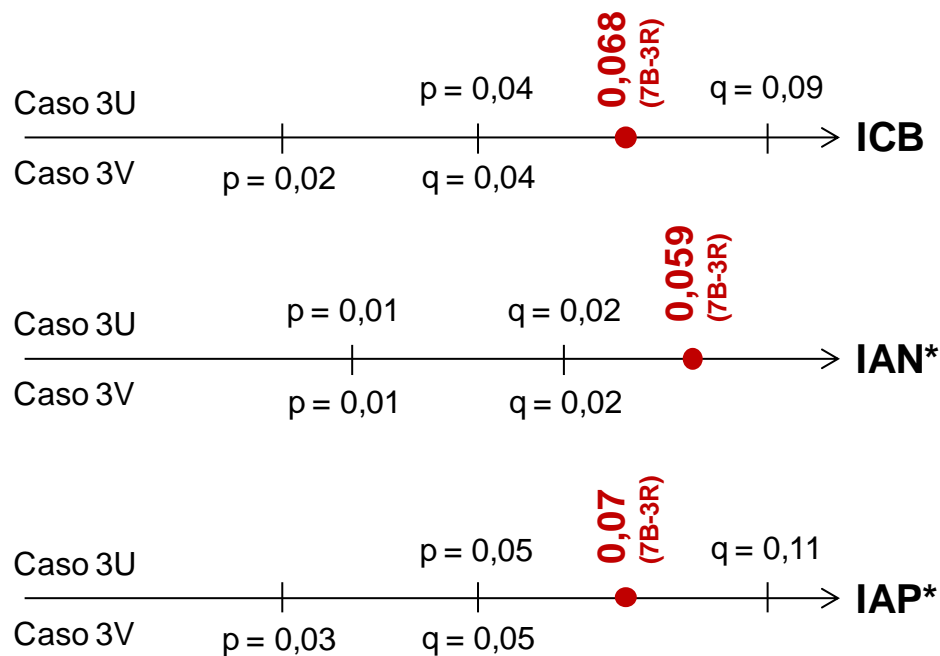


Figura 23: Desempenho das alternativas 7B e 3R (casos 3U e 3V).

Uma terceira opção seria analisar individualmente cada critério, diminuindo gradativamente o valor dos parâmetros, até que, seja possível diferenciar as alternativas considerando critérios em separado. Vale ressaltar que a não ocorrência de empates

considerando os critérios em separado, não garante que não haverá empates quando estes forem considerados juntos. Conforme as informações da Tabela 21, os casos 3AA a 3AC consideraram apenas o critério ICB e os casos 3AD a 3AG apenas o IAP*. Foi considerado apenas um caso para o critério IAN* (caso 3AH), pois a ordenação com a opção de parâmetros iguais a 1 DP e 2 DP já é satisfatória, uma vez que, apesar de apresentar empate entre algumas alternativas, os desempenhos das alternativas são realmente muito próximos e, assim, estas alternativas, deveriam realmente estar empatadas.

Tabela 21: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3AA a 3AH).

Caso	Peso dos critérios					Parâmetros	
	ICB	IAN*	IAP*	BENEF	IAP	Indiferença	preferência
3AA	1	-	-	-	-	0,5 DP	1 DP
3AB	1	-	-	-	-	0,25 DP	0,5 DP
3AC	1	-	-	-	-	0,125 DP	0,25 DP
3AD	-	-	1	0,5	0,5	0,5 DP	1 DP
3AE	-	-	1	0,5	0,5	0,25 DP	0,5 DP
3AF	-	-	1	0,5	0,5	0,125 DP	0,25 DP
3AG	-	-	1	0,5	0,5	0,0625 DP	0,125 DP
3AH	-	1	-	-	-	1 DP	2 DP
DP (com AA)	0,18	0,03	0,21	-	-	-	-

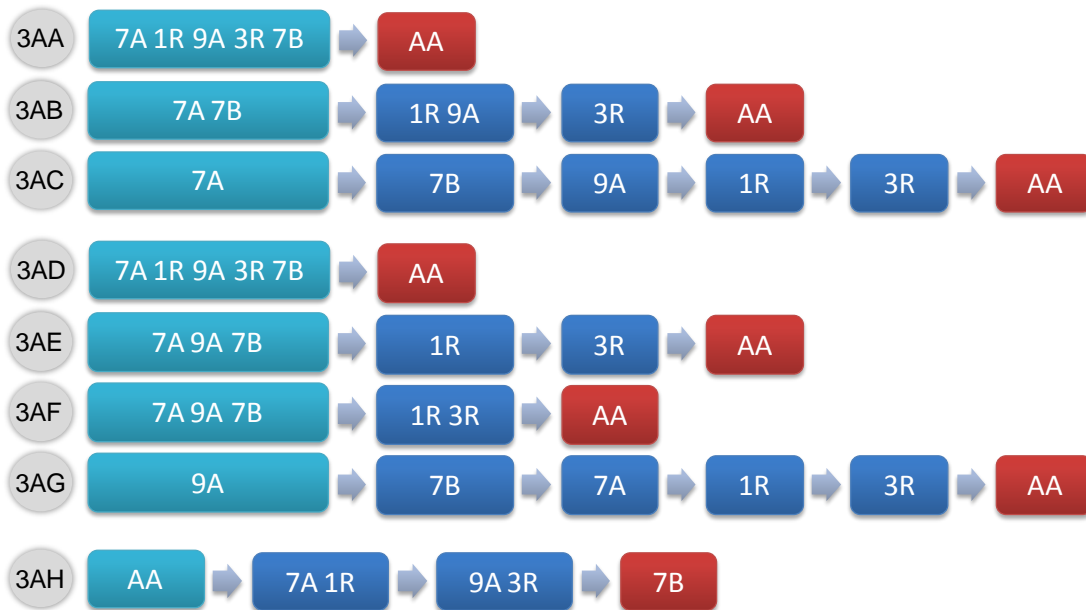


Figura 24: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3AA a 3AH).

A partir dos resultados esquemáticos apresentados na Figura 24, verifica-se que para os critérios ICB e IAP* foi possível diminuir o valor dos parâmetros de tal modo que a ordenação considerando apenas um critério não houvesse empate entre alternativas (casos 3AA a 3AF). Para o critério IAN*, não foi necessário reduzir muito os valores dos parâmetros, uma vez que, o resultado do caso 3AH já foi satisfatório. Após a escolha dos “melhores” parâmetros para cada critério, o ELECTRE III foi executado novamente, considerando os 3 critérios, cada um com seus parâmetros mais satisfatórios (caso 3AI), a saber:

- Critério ICB: parâmetro de preferência = 0,125 DP; indiferença = 0,25 DP;
- Critério IAN*: parâmetro de preferência = 1 DP; indiferença = 2 DP; e
- Critério IAP*: parâmetro de preferência = 0,0625 DP; indiferença = 0,125 DP.

A Figura 25 esquematiza a ordenação das alternativas considerando os parâmetros apresentados acima.

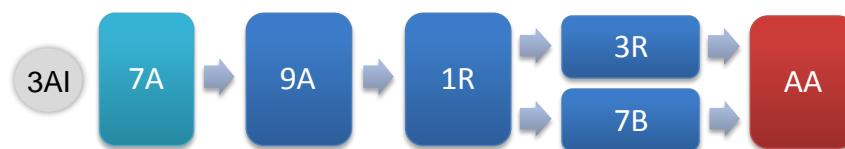


Figura 25: Ordenação das alternativas segundo ELECTRE III (caso 3AI).

Apesar das sugestões apresentadas anteriormente, cujo principal objetivo foi mostrar a importância da definição dos valores dos parâmetros de indiferença e preferência, a determinação dos valores destes parâmetros deve ser feita tendo o cuidado de avaliar se os valores definidos realmente traduzem o seu significado, ou seja, o parâmetro de indiferença de um critério realmente indica que se a diferença de desempenho entre duas alternativas for menor que este valor, as alternativas são realmente indiferentes, em outras palavras, tanto faz escolher uma das alternativas. Esta atenção é fundamental para a boa execução do processo de tomada de decisão. Por exemplo, se os valores dos parâmetros forem bem definidos e houver consenso entre os tomadores de decisão, e caso duas alternativas fiquem empatadas como a preferível, não há por que uma das partes não concordar com a escolha de qualquer uma das duas alternativas como a preferível do Estudo.

Assim, ainda utilizando como base o caso 3N, optou-se por diminuir os parâmetros separadamente, de modo que ambos reflitam seu real objetivo, principalmente o parâmetro de preferência, que quando considerado muito pequeno, não reflete seu propósito, podendo influenciar equivocadamente a tomada de decisão. Nos procedimentos dos casos anteriores, ambos os parâmetros eram diminuídos simultaneamente a cada tentativa de diferenciação das alternativas. No caso a seguir (3AJ), os parâmetros foram alterados com o intuito de diferenciar ainda mais as alternativas, porém, tomando o cuidado de observar sua eficácia. Na Tabela 22 são apresentadas informações das performances das alternativas que subsidiaram a escolha dos parâmetros, bem como, os parâmetros escolhidos.

Tabela 22: Informações para cada critério (caso 3AJ).

	ICB (↓)	IAN* (↓)	IAP* (↑)
7A	0,535 (MIN)	0,612	0,530
1R	0,570	0,616	0,490
7B	0,543	0,667 (MÁX)	0,540
9A	0,566	0,606	0,545 (MÁX)
3R	0,611	0,608	0,470
AA	1,000 (MÁX)	0,570 (MIN)	0,000 (MIN)
Δ Mínimo	0,004	0,002	0,005
Δ Máximo	0,465	0,097	0,545
Δ Máximo (s/ AA)	0,076	0,061	0,075
p_{final}	0,04 (0,25DP)	0,03 (1DP)	0,03 (0,125DP)
q_{final}	0,18 (1DP)	0,05 (1,6DP)	0,11 (0,5DP)

Em termos de ICB, utilizar os parâmetros 0,04 e 0,18 (indiferença e preferência, respectivamente), permite diferenciar as alternativas AA (todas as demais tem preferência estrita) e 3R (todas as demais, sem contar a AA, tem preferência fraca), sendo as demais indiferentes entre si. Analisando as performances das alternativas, a AA é realmente muito pior que as demais, seguida da 3R que apresenta um ICB um pouco pior, e as demais alternativas, podem ser consideradas com ICBs próximos. Ainda seria possível diminuir mais o parâmetro de indiferença, se o tomador de decisão julgasse pertinente diferenciar ainda mais as alternativas, fazendo com que as alternativas 7A e 7B tivessem preferência fraca em relação a 9A e 1R.

Em relação ao critério IAN*, utilizar os parâmetros 0,03 e 0,05 (indiferença e preferência, respectivamente), permite diferenciar a alternativa AA como melhor que as demais (preferência fraca) e 7B como a pior de todas (preferência estrita das demais em relação a esta), sendo as demais indiferentes entre si. Analisando as performances das alternativas, verifica-se que as alternativas 7A, 1R, 9A e 3R realmente possuem impactos muito próximos, sendo o desempenho da alternativa 7B muito pior que as demais e a da alternativa AA melhor que as demais.

Quanto ao IAP*, utilizar os parâmetros 0,03 e 0,11 (indiferença e preferência, respectivamente), permite diferenciar a alternativa AA como a pior de todas (preferência estrita) e as alternativas 3R e 7B, que são indiferentes entre si, mas piores que as demais (todas as demais, sem contar a AA, tem preferência fraca em relação a estas), e as demais alternativas indiferentes entre si. Analisando as performances das alternativas, a AA é realmente a pior, seguida da 3R e 7B, que diferentemente da AA, possuem desempenho mais próximo das demais alternativas. As alternativas 7A, 1R e 9A possuem impactos positivos parecidos.

Na Figura 26 é apresentada a ordenação do caso 3N e do caso 3AJ. Observa-se que foi possível diferenciar as alternativas, não havendo empates. Ocorreu uma incomparabilidade entre as alternativas AA e 7B como piores alternativas, sendo que no caso 3N estas já eram as piores alternativas. A diminuição dos parâmetros piorou a posição da alternativa 3R na ordenação. No caso 3N, esta alternativa estava empatada com a 9A como melhor alternativa e no caso 3AJ ficou em penúltima posição. Isto se deve ao alto valor dos parâmetros de indiferença dos critérios no caso 3N, fazendo com que as alternativas 3R e 9A fossem indiferentes. Diminuindo os parâmetros, para os critérios ICB e IAP*, a alternativa 9A passou a ter preferência fraca em relação a 3R. O mesmo aconteceu entre as alternativas 3R e 7A, por isso, a 3R ficou numa posição pior que a 7A no caso 3AJ.

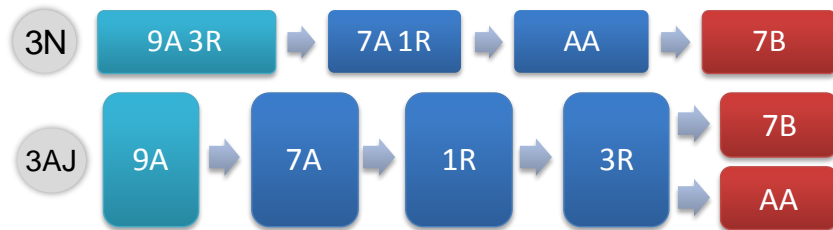


Figura 26: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3N e 3AJ).

Vale ressaltar que, apesar do ELECTRE III permitir informar a importância dos critérios, de certa forma os valores dos parâmetros de indiferença e preferência também indicam a importância dos critérios, isto é, quanto maiores os valores dos parâmetros de um determinado critério, pode-se traduzir como uma menor importância deste critério, uma vez que, menores serão as chances deste critério conseguir diferenciar as alternativas. Quanto menores os valores dos parâmetros, maiores as chances das alternativas serem diferenciadas e, assim, a influência deste critério na tomada de decisão será maior. Indo ao extremo, considerar como parâmetro de indiferença um valor superior a maior diferença entre duas alternativas, fará com que as alternativas não sejam diferenciadas por este critério, pois estarão todas empatadas. Para exemplificar foram executados os seis casos a seguir descritos na Tabela 23, cujos resultados são apresentados na Figura 27.

Tabela 23: Dados para execução do ELECTRE III (casos 3AJ a 3AO).

Caso	Peso dos critérios			Parâmetros					
	ICB	IAN*	IAP*	Indiferença			preferência		
				ICB	IAN*	IAP*	ICB	IAN*	IAP*
3AJ	1	1	1	1 DP	1,0	1,0	2 DP	2,0	2,0
3AK	1	-	-	1 DP	-	-	2 DP	-	-
3AL	-	1	-	1,0	1 DP	1,0	2,0	2 DP	2,0
3AM	-	1	-	-	1 DP	-	-	2 DP	-
3AN	-	-	1	1,0	1,0	1 DP	2,0	2,0	2 DP
3AO	-	-	1	-	-	1 DP	-	-	2 DP

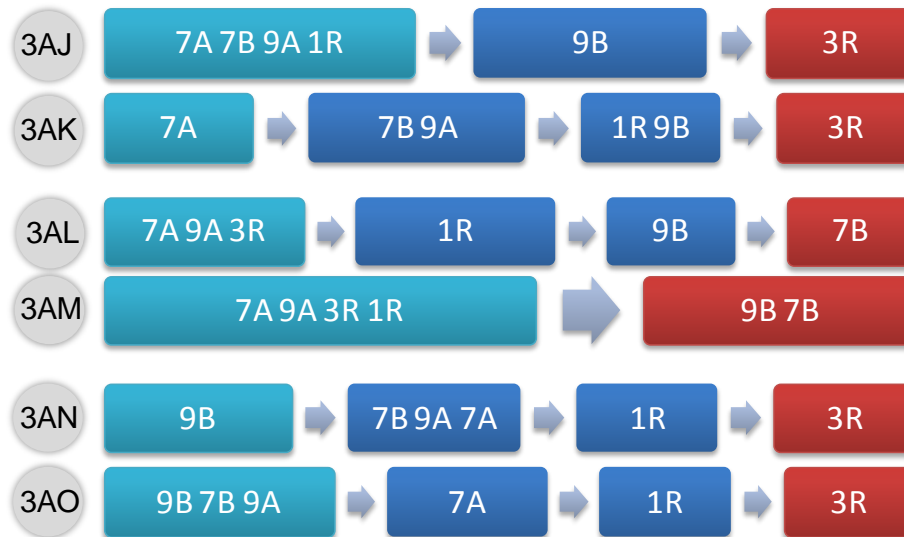


Figura 27: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos 3AJ a 3AO).

A partir dos resultados, pode-se observar o que havia sido concluído sobre a influência dos critérios em relação aos valores dos parâmetros. O caso 3AJ foi executado considerando os três parâmetros (ICB, IAN* e IAP*) todos com mesma importância, sendo que os parâmetros dos critérios IAN* e IAP* foram altos, de tal modo a não diferenciar as alternativas e os parâmetros do ICB foram iguais a 1DP (indiferença) e 2DP (preferência). O caso 3AK foi executado considerando apenas o critério ICB com parâmetros iguais ao do caso 3AJ. Ambas as ordenações podem ser consideradas semelhantes. Considerar apenas o critério ICB (caso 3AK) permitiu diferenciar mais as alternativas, mas não houve troca de ordenação. As mesmas conclusões podem ser estendidas para os outros dois critérios.

5.6.3. Caso representativo

Para facilitar as análises e comparações entre os diversos métodos, pode-se considerar como um resultado representativo do método ELECTRE III o obtido no caso 3D (que obteve a mesma ordenação dos casos 3E, 3J e 3K) e como o resultado mais próximo da soma ponderada o caso 3G. Apesar do caso 3G apresentar empate entre as alternativas 1R e 9B e incomparabilidade entre estas duas alternativas e a 7B, este foi o único caso que estas três alternativas não estavam em uma ordenação diferente da ordenação da soma ponderada. Em geral, o ELECTRE III melhorou a posição da 1R e piorou a 7B em relação a ordenação da soma ponderada.

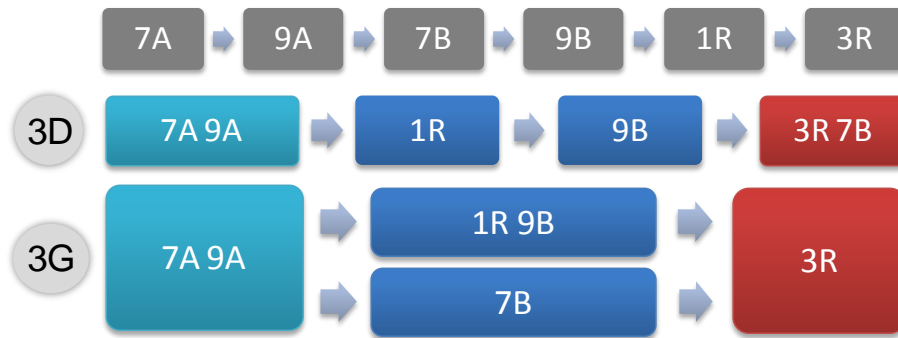


Figura 28: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE III (casos representativos).

5.6.4. Conclusões

A partir dos resultados apresentados anteriormente, com relação ao ELECTRE III, a definição dos valores dos parâmetros de indiferença e preferência tem 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. Como visto, utilizar valores altos para os parâmetros de preferência e indiferença, num primeiro momento, não é interessante para Estudos de Inventário, com o intuito de se evitar empates entre alternativas. Porém, se estes valores realmente refletirem a opinião do decisor, o empate entre as alternativas é uma informação relevante para a tomada de decisão, mesmo que posteriormente os parâmetros sejam ajustados buscando ordenação total das alternativas. Assim, a determinação dos parâmetros de indiferença e preferência deve ser feita tendo o cuidado de avaliar se os valores definidos realmente traduzem o seu significado. Sendo este cuidado fundamental para a boa execução do método.

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. Na definição dos parâmetros do método, optou-se inicialmente por utilizar medidas do desvio-padrão, de modo a considerar a variabilidade do desempenho das alternativas. Acredita-se que esta seja uma primeira opção de parâmetros (parâmetro de indiferença igual a um desvio-padrão e o parâmetro de preferência igual a dois desvios-padrão) e, a partir dos resultados de uma primeira aplicação, o tomador de decisão, conhecendo melhor o problema, analisar a performance

das alternativas frente cada critério e se sentir seguro e familiarizado com o problema para definir melhor os parâmetros, ou seja, parâmetros mais condizentes com a bacia em estudo.

Durante a aplicação dos casos, observou-se que esta definição inicial de parâmetros pode não ser efetiva quando uma das alternativas possui desempenho muito dispare das demais, como é o caso da alternativa AA. Para estes casos, nesta tese foram sugeridas opções de alteração dos parâmetros de modo a obter valores que consigam diferenciar as alternativas. Para isso, propõe-se: (i) calcular o desvio-padrão (e posterior cálculo dos parâmetros) desconsiderando a alternativa muito dispare; (ii) diminuir gradativamente os parâmetros até valores considerados razoáveis; ou (iii) analisar individualmente os critérios, diminuindo gradativamente em separado. É importante observar que a opção de diminuir gradativamente os critérios em separado é mais interessante e efetiva do que a que diminui todos os critérios em conjunto, pois a alternativa muito dispare pode não apresentar esta característica em todos os critérios.

É importante notar que o método não garante a total ordenação das alternativas. Assim, se a definição dos valores dos parâmetros for feita corretamente e o resultado levar a indiferença entre as alternativas mais preferíveis, ainda assim, como o objetivo dos Estudos de Inventário é selecionar uma alternativa, os valores destes parâmetros podem ser revistos de forma que permitam a diferenciação entre as alternativas ou pode-se adotar um critério adicional para a diferenciação das alternativas. O mesmo raciocínio pode ser feito para a ocorrência de incomparabilidade entre alternativas. Num primeiro momento, este critério adicional pode estar vinculado a um maior (ou menor) dificuldade no processo de licenciamento ambiental dos projetos constantes da alternativa ou minimização de conflitos com os demais usuários da água na bacia ou dos setores atuantes na bacia, tendo como objetivo a facilidade para implantação de todos os projetos.

O mesmo cuidado deve ser considerado na definição dos pesos dos critérios, pois, conforme observado nas aplicações, diferentes pesos podem obter distintas ordenações das alternativas.

Salienta-se ainda que, apesar do ELECTRE III permitir informar importância diferente para os critérios, a definição dos parâmetros de preferência e indiferença também

podem indicar a preferência ou importância de um critério frente a outro, de acordo com o grau de diferenciação permitido pelo parâmetro considerado para o critério.

5.7. Abordagem 4: ELECTRE IV (ICB, IAN* e IAP*)

5.7.1. Aplicação

Assim como nas abordagens anteriores, os critérios considerados para aplicação do ELECTRE IV na análise multiobjetivo do Estudo de Inventário foram: ICB, IAN* (considerando o impacto fora da bacia) e o IAP* (considerando o benefício ambiental). Os valores dos critérios de cada alternativa foram os mesmos apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10.

Conforme descrito no capítulo 4, o ELECTRE IV utiliza como informações a serem fornecidas pelo decisor os parâmetros de preferência e indiferença para cada critério, sem a necessidade de informar a importância entre os critérios. Nesta abordagem, foram considerados oito casos (casos 4A a 4H), cujas diferenças são:

- Parâmetros de preferência e indiferença dos critérios ICB, IAN* e IAP*: no total foram consideradas três opções de pares de parâmetros, com a mesma lógica das opções utilizadas nas aplicações com o ELECTRE III. As opções foram os pares de parâmetros variando de 1DP e 2DP (indiferença e preferência, respectivamente) até 3DP e 4DP. Para os casos que consideraram a alternativa AA, foram utilizadas duas opções de cálculo de desvio-padrão, a primeira que inclui a alternativa AA e a segunda que não inclui;
- Peso entre os benefícios IAP e BENEFA para formação do índice IAP*: foram consideradas duas opções de pesos, sendo a primeira pesos iguais a 0,5 para os dois benefícios, e a segunda, admitiu-se que os benefícios ambientais eram mais importantes, sendo considerados pesos iguais a 0,2 e 0,8 para o IAP e BENEFA, respectivamente; e
- Consideração (ou não) da alternativa AA.

A Tabela 24 apresenta resumidamente as informações utilizadas nos casos do ELECTRE IV e as Figura 29 e Figura 30 esquematizam os resultados da ordenação das alternativas para os casos 4A a 4F e 4G a 4P, respectivamente.

Tabela 24: Dados para execução do ELECTRE IV (casos 4A a 4P).

Caso	Critérios					Parâmetros		Considera alternativa AA?
	ICB	IAN*	IAP*	BENEF	IAP	Indiferença	preferência	
4A	-	-	-	0,5	0,5	1 DP ₁	2 DP ₁	Não
4B	-	-	-	0,5	0,5	2 DP ₁	3 DP ₁	Não
4C	-	-	-	0,5	0,5	3 DP ₁	4 DP ₁	Não
4D				0,8	0,2	1 DP ₁	2 DP ₁	Não
4E	-	-	-	0,8	0,2	2 DP ₁	3 DP ₁	Não
4F	-	-	-	0,8	0,2	3 DP ₁	4 DP ₁	Não
4G	-	-	-	0,5	0,5	1 DP ₂	2 DP ₂	Sim
4H	-	-	-	0,5	0,5	1DP ₂ / 2DP ₂	2DP ₂ / 3DP ₂	Sim
4I	-	-	-	0,8	0,2	1 DP ₂	2 DP ₂	Sim
4J	-	-	-	0,8	0,2	1DP ₂ / 2DP ₂	2DP ₂ / 3DP ₂	Sim
4K	-	-	-	0,5	0,5	1 DP ₃	2 DP ₃	Sim
4L	-	-	-	0,5	0,5	2 DP ₃	3 DP ₃	Sim
4M	-	-	-	0,5	0,5	3 DP ₃	4 DP ₃	Sim
4N	-	-	-	0,8	0,2	1 DP ₃	2 DP ₃	Sim
4O	-	-	-	0,8	0,2	2 DP ₃	3 DP ₃	Sim
4P	-	-	-	0,8	0,2	3 DP ₃	4 DP ₃	Sim
DP ₁	0,03	0,03	0,03	-	-	-	-	Não
DP ₂	0,18	0,03	0,21 / 0,27	-	-	-	-	Sim
DP ₃	0,03	0,03	0,03	-	-	-	-	Não

5.7.2. Resultados



Figura 29: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE IV (casos 4A a 4F).

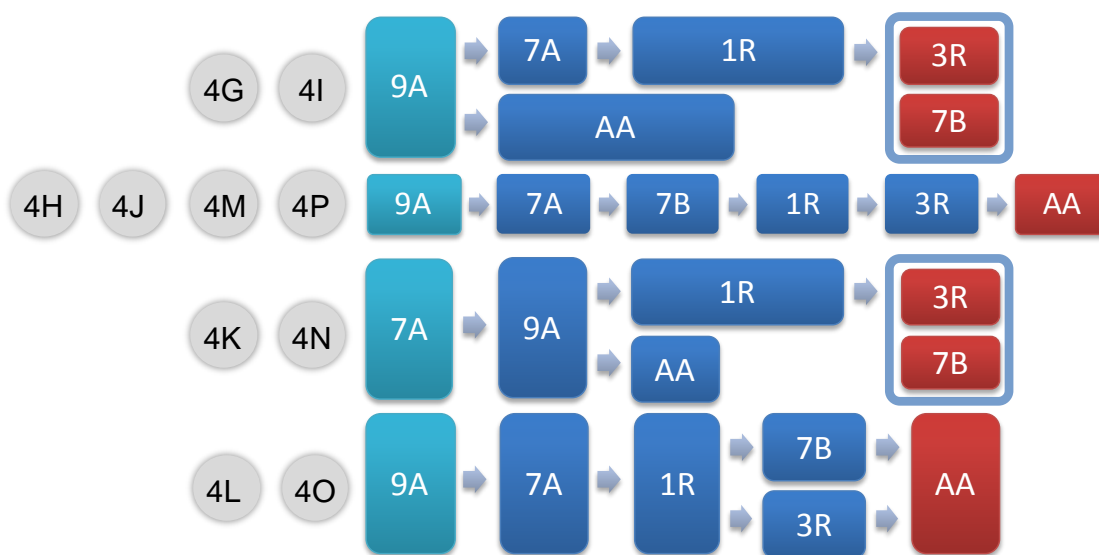


Figura 30: Ordenação das alternativas, segundo ELECTRE IV (casos 4G a 4P).

Como pode ser observado pela Figura 29 e pela Figura 30, os pares de casos 4B e 4E, 4C e 4F, 4G e 4I, 4H e 4J, 4K e 4N, 4L e 4O e 4M e 4P, que diferem apenas pelo cálculo do IAP* das alternativas (utilizando pesos iguais a 0,5 entre o benefício e o IAP e utilizando peso igual a 0,8 para o benefício e 0,2 para o IAP, respectivamente) apresentaram mesma ordenação, o que indica que, para os valores considerados, não há influência na tomada de decisão.

Primeiramente, os casos 4A e 4D consideraram como parâmetros de indiferença e preferência, respectivamente, os valores de um desvio-padrão e dois desvios-padrão, pois, conforme sugerido na conclusão do ELECTRE III (item 5.6.4), seria uma boa primeira opção de parâmetros para aquele método. Porém, neste estudo de caso, utilizando o ELECTRE IV, observa-se ocorrência de incomparabilidades entre alternativas. No caso 4A em termos de melhor alternativa entre a 7A e a 9A e também entre a 9B e 1R, e no caso 4D entre as alternativas 7B e 9B. No caso 4A, apesar da incomparabilidade, ambas as alternativas 7A e 9A foram consideradas melhores que as alternativas 9B e 1R.

Com o intuito de diminuir estas incomparabilidades e obter uma total ordenação das alternativas foram testados mais dois pares de parâmetros, aumentando seus valores. Os casos 4B e 4E utilizaram valores iguais a dois desvios-padrão e três desvios-padrão para os parâmetros e o resultado foi satisfatório, obtendo ordenação total das alternativas sem ocorrência de empates e nem incomparabilidades. Comparando estes dois casos com o caso 3A, que utilizou o ELECTRE III com os mesmos parâmetros, no caso 3A ainda não era possível diferenciar totalmente as alternativas, evidenciando que o ELECTRE IV parece ser menos sensível do que o ELECTRE III em relação às alterações dos valores dos parâmetros. Por curiosidade, foram considerados ainda os valores de três desvios-padrão e quatro desvios-padrão para os parâmetros (casos 4C e 4F) e, como esperado, por utilizar parâmetros maiores, resultaram em empate, no caso das alternativas 1R, 9B e 7B, mantendo a 9A como melhor alternativa (seguida da 7A) e a 3R como pior.

Os casos que utilizaram menores parâmetros (casos 4A e 4D) a alternativa 7A foi considerada como melhor alternativa (sendo a 9A incomparável a esta também na primeira posição). Os demais casos obtiveram a 9A como melhor alternativa, seguida da 7A. Em todos os casos, a pior alternativa foi a 3R.

Com a inclusão da alternativa AA (casos 4G a 4P), os casos com menores valores dos parâmetros tiveram incomparabilidades entre as alternativas, em geral com a alternativa AA, conforme identificado também nos casos utilizando o ELECTRE III. Isto indica que a alternativa AA é realmente um caso distinto dos demais e, dependendo dos valores dos parâmetros, não sendo possível sua comparação com as demais alternativas. Assim como nos casos que não consideraram a alternativa AA, com o aumento dos parâmetros, as incomparabilidades diminuíram, até conseguir ordenação total das

alternativas (casos 4H, 4J, 4M e 4P). Ressalta-se que, como o desvio-padrão dos critérios ICB e IAP* considerando a alternativa AA, já são valores altos, o que dificulta a diferenciação das alternativas, nos casos 4H e 4J, aumentou-se apenas os parâmetros do critério IAN* e se obteve ordenação total das alternativas.

Os casos com menores parâmetros obtiveram a alternativa 3R e 7B como piores alternativas (e incomparáveis entre si, ou seja, ambas eram as piores, mas não foi possível definir qual é a pior dentre as duas). Nestes casos, como a alternativa AA ficou incomparável com as demais alternativas (exceto com a 9A), a AA também pode ser considerada como uma opção de pior alternativa também. Nos demais casos, a alternativa AA foi a pior. Em termos de melhor alternativa, a 7A foi considerada a melhor alternativa nos casos que os parâmetros tinham menores valores (opção de desvio-padrão sem considerar a alternativa AA) e a 9A foi considerada a melhor nos casos que os parâmetros foram calculados com o desvio-padrão incluindo a alternativa AA.

Ainda utilizando o ELECTRE IV, foi testado mais um caso (caso 4Q) utilizando os mesmos parâmetros de preferência e indiferença do caso 3AJ, conforme Tabela 25, que foram obtidos pela análise das performances das alternativas nos critérios, procurando diferenciar as alternativas que realmente tinham desempenhos distintos. O resultado da ordenação do caso 4Q coincidiu com a ordenação dos casos 4G e 4I, apresentados na Figura 30.

Tabela 25: Dados para execução do ELECTRE IV (caso 4Q).

	ICB	IAN*	IAP*
Indiferença	0,04 (0,25DP)	0,03 (1DP)	0,03 (0,125DP)
preferência	0,18 (1DP)	0,05 (1,6DP)	0,11 (0,5DP)

5.7.3. Caso representativo

Pode-se considerar como um resultado representativo do método ELECTRE IV a ordenação obtida no caso 4B, uma vez que esta ordenação não contradiz nenhuma ordenação dos demais casos, com exceção da alternativa 7A ter sido melhor que a 9A no caso 4D e, nos casos de incomparabilidade, a ordenação das duas alternativas incomparáveis (em termos das alternativas que são melhores e piores a elas) também se

manteve, como por exemplo, no caso 4D, as duas alternativas incomparáveis 7B e 9B são melhores que a 3R e piores que a 1R, respeitando a ordenação obtida no caso 4B. O resultado mais próximo da soma ponderada foi o caso 4D, que respeitou a ordenação da alternativa 7A melhor que a 9A. Todos os casos do ELECTRE IV consideraram a alternativa 1R em melhor posição do que a ordenação pela soma ponderada e o contrário em relação a alternativa 7B.

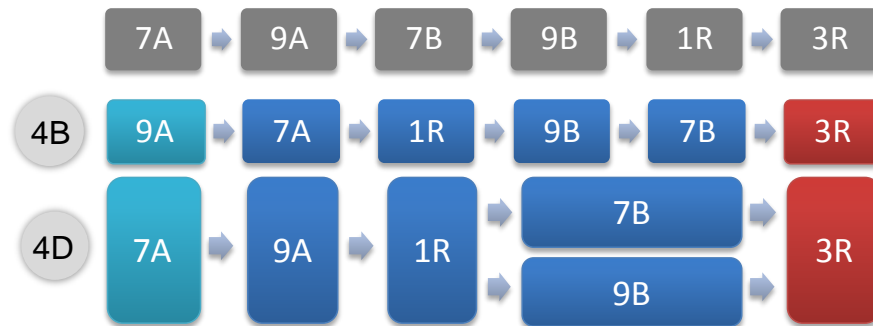


Figura 31: Ordenação dos casos representativos do ELECTRE IV (casos representativos).

5.7.4. Conclusões

Assim como o ELECTRE III, o objetivo do ELECTRE IV é a ordenação de alternativas, o que não impede que ocorram incomparabilidades ou empates entre alternativas, de forma que não é garantido pelo método a total ordenação das alternativas. A escolha dos parâmetros de preferência e indiferença tem papel fundamental para um resultado satisfatório de ordenação, se possível, sem incomparabilidades e empates. Neste estudo de caso, foi possível obter a ordenação total das alternativas ajustando os parâmetros de tal forma que não fossem valores nem tão baixos (evitando incomparabilidades) e nem tão altos (evitando empates).

A ordenação das alternativas, quando se inclui a alternativa AA, não se altera muito, com exceção da ordenação das alternativas 7B e 1R, que é invertida. A alternativa AA se mostrou como a pior alternativa, sendo a 3R a pior quando aquela alternativa não é considerada.

Quanto a ordenação do caso referência, observa-se algumas alterações. A primeira é a inversão do ranking das alternativas 7A com a 9A, melhor alternativa no caso referência

e melhor alternativa segundo ELECTRE IV, respectivamente. E a segunda é o melhor posicionamento da alternativa 7B (e conseqüente pior posicionamento da 1R) no caso referência.

5.8. Conclusões das Aplicações

Neste item é feita uma comparação dos quatro métodos aplicados (soma ponderada, VIP Analysis, ELECTRE III e ELECTRE IV) considerando seus casos mais representativos e os que obtiveram a ordenação das alternativas mais próximo do método da soma ponderada. Vale destacar que estes métodos, conforme apresentado no capítulo 4, apresentam naturezas diferentes. A soma ponderada e o VIP são métodos aditivos compensatórios, sendo a soma ponderada um método que utiliza pesos específicos e permite realizar a ordenação das alternativas e o VIP utiliza informação incompleta para os pesos, através de intervalos de pesos e restrições lineares, e tem como objetivo selecionar a alternativa preferível. O ELECTRE III e IV são métodos não-compensatórios e que utilizam relações de superação para ordenar as alternativas, mas sem garantir a total ordenação, uma vez que permitem a existência de incomparabilidade e indiferença entre alternativas. Além disso, o ELECTRE III utiliza como informação adicional o peso entre critérios, mas como um coeficiente de importância e não como um *trade-off* entre critérios.

A partir da Figura 33, que apresenta o resultado mais representativo de cada método, em termos da alternativa preferível, não houve muita alteração de resultado, pois os quatro métodos seguiram um mesmo caminho, indicando como mais preferíveis as alternativas 7A e 9A. Estas alternativas são a de melhor ICB (7A) e a de melhor IAN* (9A), conforme Figura 32, sendo estes os critérios mais importantes na tomada de decisão para os Estudos de Inventário. Os métodos da soma ponderada e VIP indicam a alternativa 7A como a favorita, sendo a 9A a segunda melhor. O ELECTRE III indica um empate entre as duas alternativas e o ELECTRE IV indica a 9A, seguida da 7A, como preferível.

ICB	IAN*	IAP*
7A	9A	9B
7B	3R	9A
9A	7A	7B
1R	1R	7A
9B	9B	1R
3R	7B	3R

Figura 32: Ordenação das alternativas frente aos critérios.

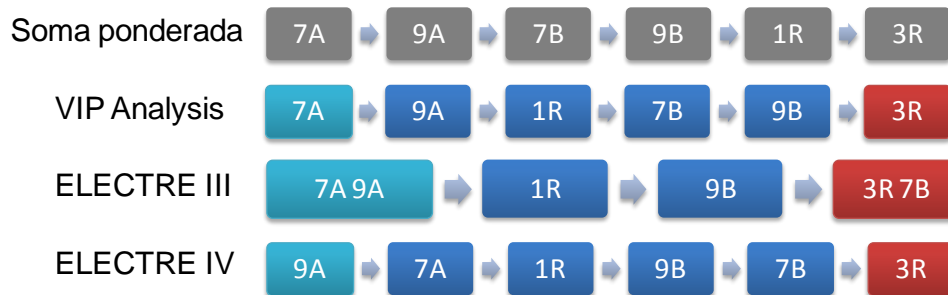


Figura 33: Ordenação das alternativas dos casos representativos de cada método.

Em termos da alternativa menos preferível, todos os métodos coincidiram com a indicação da alternativa 3R, alternativa com pior desempenho dos critérios ICB e IAP*. Uma diferença é a indicação da alternativa 7B empatada com a 3R como a menos preferível pelo método ELECTRE III, que é a alternativa com pior desempenho em termos de IAN*. Apesar de diferenciar estas duas alternativas, o resultado do ELECTRE IV ficou em consonância com o ELECTRE III, pois a 7B ficou em penúltimo lugar no ranking. Pelo VIP, a 7B ficou melhor posicionada (em antepenúltimo lugar) e pela soma ponderada, esta alternativa se beneficiou ficando na posição de terceira no ranking. Este melhor posicionamento da 7B no método da soma ponderada é justificado pela compensação do seu pior desempenho no critério IAN*, pelo seu melhor desempenho, principalmente, no critério ICB (segunda melhor alternativa).

Outra diferença em termos de resultado foi o posicionamento das alternativas 9B e 1R. Pelo método da soma ponderada, a 9B ficou melhor posicionada do que a 1R, devido ao seu melhor desempenho no critério IAP*, compensando seu pior desempenho nos demais critérios em relação a 1R, mesmo o critério IAP* sendo o de menor importância. Os demais métodos indicam a alternativa 1R melhor que a 9B, ficando a 1R em terceira posição (e segunda posição no ELECTRE III, dado que houve empate entre duas alternativas na primeira posição). De fato, pelo desempenho das alternativas nos critérios mais importantes (ICB e IAN*), a 1R pode ser considerada melhor que a 9B.

Pelo exposto, os resultados mais representativos indicam a lógica de hierarquização das alternativas característica de cada método. Enquanto o método da soma ponderada compensa um pior desempenho em um dado critério por um melhor desempenho em outro, os demais métodos, consideram a performance das alternativas nos critérios, de modo que alternativas com desempenho ruim em um dos critérios, são prejudicadas em termos de posicionamento no ranking, como foi o caso das alternativas 7B e 3R.

Em relação aos resultados mais próximos do obtido pela soma ponderada, conforme Figura 34, com o VIP foi possível obter o mesmo resultado, para isso, os intervalos de pesos considerados foram 0,2 a 0,5 para os três critérios e não foram utilizadas restrições de pesos entre critérios, o que significou não diferenciar os critérios em termos de importância. Para os métodos ELECTRE, a ordenação mais próxima só foi possível considerando os casos de empates e incomparabilidades, principalmente, entre as alternativas 1R, 9B e 7B, que apresentaram as maiores alterações de ranking em comparação com a soma ponderada.

Esta análise evidencia as características dos métodos, sendo a soma ponderada um método totalmente compensatório, o ELECTRE não-compensatório e o VIP que apesar de ser um método compensatório, apresenta característica intermediária entre estes dois tipos, podendo obter resultados próximo dos métodos compensatórios e também próximo dos métodos não-compensatórios, bastando para isso a devida escolha dos parâmetros. Por isso, o cuidado na escolha dos parâmetros é de extrema importância.



Figura 34: Ordenações considerando o resultado mais próximo do obtido pela soma ponderada.

Com relação à alternativa AA, a grande maioria dos casos indicou não ser vantajosa a opção de não exploração do potencial da bacia, uma vez que, em geral, esta alternativa ocupava uma posição ruim na ordenação final das alternativas. Por se tratar de uma alternativa muito dispare das demais, em alguns casos do ELECTRE houve incomparabilidade desta com as demais, porém, em todos os casos existia uma alternativa de exploração do potencial melhor que esta.

Em termos de definição dos parâmetros dos métodos, a consideração da alternativa AA pode atrapalhar um pouco a definição dos parâmetros do ELECTRE caso sejam utilizadas medidas de desvio-padrão para o valor inicial dos parâmetros, conforme observado nas aplicações. Para solucionar este problema, nesta tese foram propostas algumas soluções, que podem ser utilizadas não apenas com a alternativa AA, mas com qualquer estudo que apresente uma alternativa com desempenhos muito diferente das demais. Porém, isto não se configura como restrição para aplicação do ELECTRE nos Estudos de Inventário, uma vez que a sugestão de medidas de desvio-padrão está associada a um valor inicial dos parâmetros, para posterior adequação dos mesmos mediante melhor conhecimento do problema pelo tomador de decisão.

Assim, em termos de tomada de decisão, a inclusão da alternativa AA nos Estudos de Inventário permite avaliar já nesta etapa a aptidão da bacia para exploração de seu potencial hidrelétrico ou não. No capítulo final de conclusão desta tese será retomada esta discussão quanto a importância da consideração da alternativa AA, incluindo a opinião dos especialistas/decisores.

6. OPINIÃO DE ESPECIALISTAS / DECISORES

De acordo com ROY et al (2013), a escolha do método multicritério mais apropriado para auxiliar na tomada de decisão de um determinado problema não pode considerar apenas a comparação dos resultados obtidos pelos métodos candidatos. Existem questões mais relevantes a serem consideradas relacionadas tanto às características dos métodos e do processo de decisão, quanto à opinião/preferências dos decisores. Estas questões serão melhor abordadas no capítulo 7 desta tese.

Em consonância com esta idéia, desde o início da tese, se considerava pertinente incluir na discussão a opinião de especialistas em Estudos de Inventário e decisores envolvidos no processo, através de questionário eletrônico.

Neste grupo de especialistas/decisores deveria constar representantes de empresas que estão diretamente relacionadas a Estudos de Inventário, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável pelo planejamento do setor elétrico e responsável por Estudos de Inventário estratégicos para o país, consultoras e empresas do setor que realizam Estudos de Inventário, a ANEEL, responsável pela aprovação dos Estudos e o Ministério de Minas e Energia que cumpre o papel de poder concedente.

O objetivo do questionário foi identificar:

1. Dificuldade na definição dos pesos relativos entre critérios;
2. Tendência quanto a preferência de algum critério na tomada de decisão (confrontando os resultados de especialistas da área energética com da área ambiental);
3. Conforto ou desconforto do decisor em considerar critérios agregados, tais como o IAN* e IAP*;
4. Que tipo de informação o decisor se sente mais confortável em disponibilizar, tendo como foco os métodos multicritério identificados como promissores no capítulo 4: intervalo de pesos (para o caso do VIP) ou parâmetros de preferência e indiferença (para o caso do ELECTRE III e IV).

Assim, após a consolidação dos novos critérios a serem considerados na nova abordagem da tomada de decisão final dos Estudos de Inventário, foi elaborado um primeiro questionário, denominado questionário preliminar, abordando, principalmente, os itens 1, 2 e 3 da lista de objetivos. A partir das análises dos resultados deste questionário preliminar, esperava-se, também, identificar pontos relevantes a serem considerados em um segundo questionário e possíveis contribuições para sua formulação.

O questionário preliminar contou com 5 perguntas, em sua maioria referentes a definição de pesos considerando três diferentes abordagens, diferenciadas pelos critérios considerados, sendo a primeira abordagem o cálculo do índice de preferência utilizando os critérios tal como estão definidos no Manual de Inventário (Equação 7.1), a segunda abordagem utilizando os critérios IAN* e IAP* no lugar do IAN e IAP, respectivamente (Equação 7.2), e uma terceira abordagem, que posteriormente foi descartada da análise, que considerava o IACE e o BENEf como critérios separados do IAN e do IAP (Equação 7.3).

$$I = (P1 \cdot ICB) + (P2 \cdot IAN) + [P3 \cdot (1 - IAP)] \quad (7.1)$$

$$I = (P1 \cdot ICB) + (P2 \cdot IAN^*) + [P3 \cdot (1 - IAP^*)] \quad (7.2)$$

$$I = (P1 \cdot ICB) + (P2 \cdot IAN) + [P3 \cdot (1 - IAP)] + (P4 \cdot IACE) + [P5 \cdot (1 - BDS)] \quad (7.3)$$

Cabe destacar que o descarte da terceira abordagem foi motivado por se considerar ser mais coerente incluir o impacto socioambiental negativo da complementação energética no índice de impacto socioambiental negativo na bacia que já é calculado para as alternativas, de tal modo que este índice considere todo o impacto socioambiental negativo da alternativa a ser considerado na tomada de decisão, ou seja, tanto o impacto dentro da bacia quanto fora. Adicionalmente, esta metodologia de cálculo do índice IAN* segue a mesma lógica de cálculo do ICB, que considera o custo de implantação, operação e manutenção dos aproveitamentos que fazem parte da alternativa, bem como, o custo de geração da complementação energética. Assim, tanto o custo adicional como o impacto socioambiental negativo da complementação energética estão sendo contemplados seguindo uma mesma lógica dentro de seus respectivos critérios. Ademais, incluir mais

critérios separados aumenta a quantidade de informação demandada pelos métodos multicritério, dificultando ainda mais sua definição pelos tomadores de decisão.

Quanto ao benefício ambiental, o intuito de inclusão dos benefícios propostos na tese está associado a complementar o que já é considerado no índice de impacto socioambiental positivo (IAP), de tal modo que este índice não considere apenas os impactos positivos socioeconômicos, mas também as ações que beneficiam ambientalmente a bacia. Assim, este índice modificado estará de acordo com a sua própria denominação “socioambiental”, contendo todos os importantes pontos de vista a serem considerados, o que de acordo com GEOPOPOULOU et al. (1997), é um aspecto importante a ser buscado pelos critérios. Adicionalmente, mantendo a lógica do Manual de Inventário de que o impacto positivo tem menor importância, não seria relevante incluir mais um critério de menor importância na tomada de decisão, de tal modo que resultasse em metade dos critérios considerados serem de menor importância e que, de certa forma, estão associados. Isto poderia dificultar ainda mais a definição dos parâmetros dos métodos, principalmente em termos de intervalos de pesos (no VIP) e peso dos critérios (no ELECTRE III).

Considerou-se como público-alvo deste primeiro questionário um conjunto limitado de especialistas, englobando tanto a área energética como a ambiental. Responderam ao questionário sete pesquisadores do CEPEL, sendo quatro da área ambiental e três da área energética, e dois engenheiros da área energética da Eletrobras, totalizando nove especialistas. Boa parte deste grupo participou da revisão do Manual de Inventário em 2007, e dos projetos IAREF e UHPLAT.

Os resultados deste questionário preliminar foram bastante interessantes tanto para as primeiras conclusões da tese como para a formulação do questionário seguinte que foi distribuído a um público mais amplo.

Com relação a definição de pesos relativos para as três abordagens consideradas no questionário preliminar, os resultados da primeira abordagem de critérios (Equação 7.1) mostrou que, em geral, os especialistas da área energética tendem a balancear mais os impactos socioambientais negativo e positivo, conforme as médias apresentadas na Tabela 26. Isto é, a média do peso do ICB é muito próximo de 0,5 e do IAN menor. Os especialistas

ambientais consideram os critérios ICB e IAN com mesmo peso (ou mesma importância) e o peso do IAP bem menor, muito inferior ao limite máximo de 0,25. Por outro lado, existe uma maior variabilidade na definição dos pesos dos especialistas da área energética em comparação com os ambientais, principalmente para o critério ICB.

Tabela 26: Média e desvio-padrão dos pesos relativos da primeira abordagem.

Público-alvo	P1 (ICB)		P2 (IAN)		P3 (IAP)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Especialistas ambientais	0,46	0,04	0,46	0,04	0,09	0,02
Especialistas energéticos	0,49	0,16	0,33	0,08	0,19	0,09
Total	0,47	0,11	0,39	0,09	0,14	0,08

Os resultados da segunda abordagem (Equação 7.2), apresentados na Tabela 27, mostraram que, em geral, os especialistas atribuíram uma importância relativa maior para o critério IAN* em comparação ao critério IAN na abordagem anterior, e os especialistas ambientais atribuíram esta maior importância do IAN* em relação, também, aos demais critérios desta abordagem. Isto é, considerar o impacto da complementação traduz em uma maior importância deste critério, indicando ser relevante considerar tal impacto. Mesmo aumentando o peso do critério IAN*, também foram atribuídos pesos maiores para o IAP* em comparação ao IAP da abordagem anterior, resultando em um menor peso para o critério ICB.

Tabela 27: Média e desvio-padrão dos pesos relativos da segunda abordagem.

Público-alvo	P1 (ICB)		P2 (IAN*)		P3 (IAP*)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Especialistas ambientais	0,42	0,04	0,47	0,06	0,12	0,07
Especialistas energéticos	0,42	0,13	0,36	0,12	0,22	0,08
Total	0,42	0,09	0,41	0,11	0,17	0,09

Na terceira abordagem (Equação 7.3), em geral, os especialistas da área energética atribuíram maior peso relativo para o critério IACE do que os da área ambiental. É importante observar que os especialistas consideram o benefício ambiental tão importante quanto o impacto socioambiental positivo (IAP), demonstrando ser relevante a sua consideração.

Tabela 28: Média e desvio-padrão dos pesos relativos da terceira abordagem.

Público-alvo	P1 (ICB)		P2 (IAN)		P3 (IAP)		P4 (IACE)		P5 (BDS)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Especialistas ambientais	0,41	0,05	0,34	0,03	0,07	0,04	0,11	0,01	0,08	0,04
Especialistas energéticos	0,38	0,16	0,24	0,07	0,11	0,02	0,16	0,08	0,11	0,09
Total	0,39	0,12	0,29	0,07	0,09	0,04	0,13	0,07	0,10	0,07

Após a definição dos pesos para a primeira abordagem, o questionário preliminar apresentou um conjunto de alternativas e seus respectivos desempenhos para os critérios, identificando a alternativa vencedora para aquela configuração de pesos. Metade dos especialistas não se sentiu confortável com o resultado encontrado, principalmente, quando a alternativa vencedora apresentava desempenho muito ruim em um dos critérios. De modo que, em geral, se espera que a alternativa vencedora tenha um desempenho minimamente satisfatório em todos os critérios. Vale ressaltar que esta informação é relevante no sentido de que é uma indicação do tipo de método multicritério que é mais aderente à preferência dos decisores, uma vez que, métodos multicritério classificados como compensatórios, não evitam a indicação de alternativas desbalanceadas como a melhor, bastando que uma alternativa com desempenho muito ruim em um critério, compense apresentando um ótimo desempenho em outro critério. Os métodos não-compensatórios seriam, então, mais apropriados para evitar que isto aconteça.

A análise dos resultados apresentou, ainda, pontos relevantes a serem levados em consideração quando da decisão da nova abordagem multiobjetivo. Salienta-se que estas conclusões levaram em consideração apenas a opinião de especialistas, não estando incluídos, decisores dos Estudos de Inventário. Merecem destaque:

- Dificuldade em atribuir pesos para os critérios sem informações sobre a bacia hidrográfica, ou seja, a importância relativa entre os critérios depende da aptidão da bacia;
- Aumento da complexidade na definição dos pesos com o aumento do número de critérios, o que contribuiu para o descarte da terceira abordagem (com cinco critérios separados);
- Dificuldade em atribuir peso para os critérios IAN* e IAP*, por serem índices que

apresentam diferentes impactos implícitos na sua quantificação, em comparação a definição de pesos para os critérios IAN e IAP. Ressalta-se, que no questionário, não foi informado nenhum detalhamento da metodologia de cálculo do IAN* e IAP*, diferentemente dos critérios IAN e IAP, já conhecidos e detalhados no Manual de Inventário; e

- Buscar diminuir a subjetividade no cálculo dos índices. Foi relatado que se atribuiu uma importância relativa menor a índices cuja quantificação é muito subjetiva, como é o caso do IAN. Salienta-se que não é o foco desta tese diminuir a subjetividade do critério IAN. Porém, buscou-se definir métodos de cálculo menos subjetivos para os critérios propostos na tese (benefício ambiental e impacto socioambiental negativo fora da bacia).

Após a definição dos métodos multicritério identificados como promissores e propostos nesta tese, foi elaborado o questionário completo abordando, principalmente, o quarto objetivo do questionário, referente ao tipo de informação que o usuário se sente mais confortável em disponibilizar na tomada de decisão quanto aos critérios: pesos específicos (metodologia atual), intervalo de pesos (VIP Analysis), parâmetros de preferência e indiferença (ELECTRE IV) ou parâmetros de preferência e indiferença e importância dos critérios (ELECTRE III).

Adicionalmente, o questionário abordou se a ampliação da abrangência do critério IAP (incluindo benefícios ambientais) acarretaria em um aumento ou não da importância deste critério frente aos demais e se deveria ser mantida uma limitação de peso para este critério. Apesar dos métodos propostos não precisarem de definição de pesos específicos, a opinião de que é relevante limitar a importância deste critério, indica que deve ser estudado alguma maneira da importância do critério ser limitada frente aos demais, de acordo com o tipo de informação demandada pelo método. Como exemplo, para o caso do VIP, poderia ser incluir uma restrição quanto ao peso dos critérios ou o intervalo de pesos do IAP* não permitir valores superiores aos dos demais critérios.

Outra questão que também foi abordada refere-se a opinião dos especialistas/decisores quanto a consideração da alternativa AA no conjunto de alternativas analisadas para escolha da melhor alternativa de divisão de quedas.

O questionário contou com três perguntas específicas e espaço livre para considerações acerca da tomada de decisão final dos Estudos de Inventário.

Este questionário foi enviado para profissionais que atuam em diferentes empresas, tais como, EPE, ANEEL, MME, empresas Eletrobras, bem como consultoras que fazem Estudos de Inventário. Trinta e seis profissionais responderam ao questionário, o que representou aproximadamente 20% do total de pessoas que receberam. As respostas estão consolidadas a seguir.

- Pergunta 1: Informação demandada pelo método multicritério

A primeira pergunta do questionário teve como objetivo identificar que tipo de informação necessária a se fornecida para a seleção da melhor alternativa do Estudo de Inventário era preferível. As opções englobavam tanto a atual informação (pesos específicos para os critérios), quanto as informações dos demais métodos.

1. Quanto a informação necessária a ser fornecida para seleção da melhor alternativa do Estudo de Inventário:

- Prefiro continuar informando peso relativo específico para cada critério. Exemplo: Peso ICB = 0,5
- Prefiro informar um intervalo de peso para cada critério (ao invés de um peso específico). Exemplo: Peso ICB variando de 0,4 a 0,6
- Prefiro não informar nada quanto a preferência ou importância relativa entre critérios, mas sim, informar o quanto a diferença de desempenho entre alternativas é indiferente ou desprezível (X) ou significativo (Y), podendo ser diferente para cada critério. Exemplo: Admitindo $X = 0,1$ e $Y = 0,2$, se a diferença de ICB entre duas alternativas for menor que 0,1, as alternativas são indiferentes em termos de ICB (tanto faz escolher uma ou outra); maior que 0,2, a alternativa de menor ICB é muito preferível a de maior ICB; entre 0,1 e 0,2, a alternativa de menor ICB é preferível
- Prefiro informar se a diferença de desempenho entre alternativas é desprezível ou significativa (igual a opção anterior) e, adicionalmente, informar quais critérios são mais importantes.

Figura 35: Pergunta 1 do questionário completo.

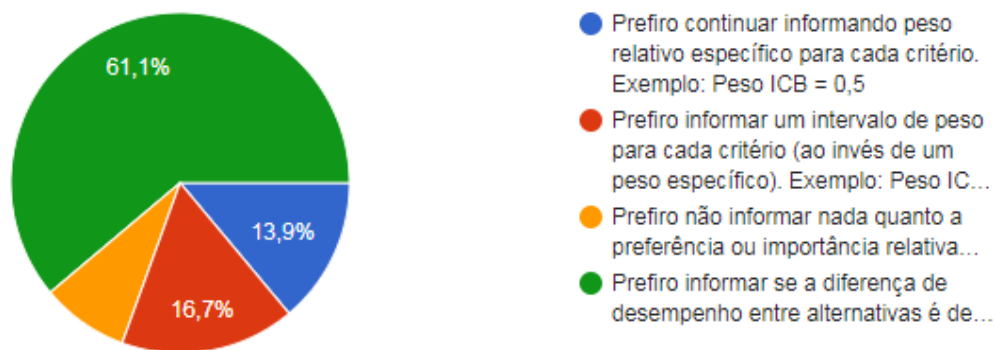


Figura 36: Respostas da pergunta 1 do questionário completo.

Das 36 respostas, aproximadamente 14% prefere continuar informando pesos específicos, assim como 16,7% prefere informar intervalo de pesos (associado ao VIP), 8,3% prefere informar os parâmetros de indiferença e preferência apenas (ELECTRE IV) e a grande maioria (61%) prefere informar os parâmetros de preferência e indiferença e a importância dos critérios (ELECTRE III).

É importante ressaltar que no questionário não foi avaliado se o respondente tinha algum conhecimento a respeito de métodos multicritério, o que poderia permitir uma análise mais aprofundada desta pergunta. A preferência quanto ao tipo de informação a ser fornecida é relevante, mas sem o conhecimento do método, não é possível avaliar a facilidade do tomador de decisão em obtê-la ou exprimi-la.

- Pergunta 2: Importância entre os critérios

A segunda pergunta teve como objetivo avaliar se a importância do critério impacto socioambiental positivo seria alterada com a ampliação de sua abrangência, ou seja, incluir não apenas aspectos socioeconômicos, mas também aspectos ambientais. Atualmente o peso deste critério é limitado a 0,25, conforme Manual de Inventário.

2. Na hipótese de ampliação da abrangência do critério impacto socioambiental positivo, de modo a incluir não apenas aspectos socioeconômicos, mas também aspectos ambientais:

- Acho que não deveria haver mais distinção de importância entre os critérios (atualmente o peso específico do IAP deve ser no máximo 0,25, frente aos demais critérios)
- Continuo achando que deve haver diferença na importância dos critérios, ou seja, os critérios ICB e IAN continuariam mais importantes na tomada de decisão que o IAP modificado, mas sem limitação de peso.
- Continuo achando os critérios ICB e IAN mais importantes, mas poderia alterar a limitação do peso específico do IAP para um valor maior que 0,25
- Continuo achando os critérios ICB e IAN mais importantes, mas poderia alterar a limitação do peso específico do IAP para um valor menor que 0,25

Figura 37: Pergunta 2 do questionário completo.

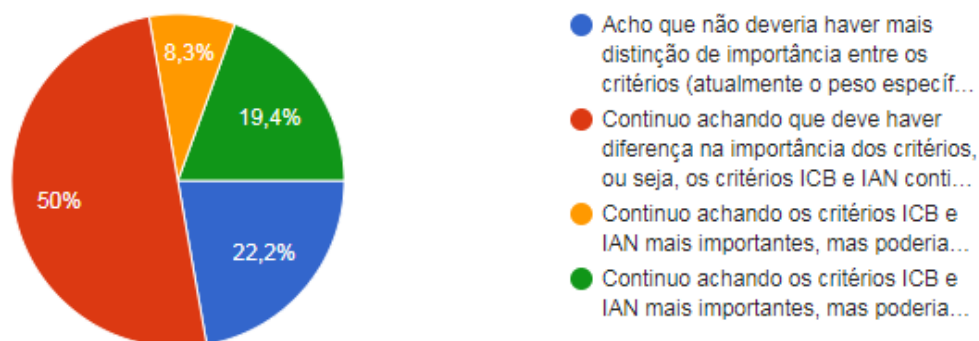


Figura 38: Respostas da pergunta 2 do questionário completo.

A grande maioria (quase 80%) respondeu que deve haver diferença de importância entre os critérios, ou seja, os demais critérios continuariam sendo mais importantes que o IAP*, sendo que 64% destes (que equivalem a 50% do total de respostas) acham que não deveria mais haver limitação quanto ao seu peso, 25% acham que esta limitação deveria ser menor que 0,25 e 11% acreditam que deveria ser maior que 0,25. Os 22,2% restantes acham que não deveria haver distinção de importância entre os critérios.

Estas respostas indicam que é relevante que o método multicritério permita diferenciar a importância dos critérios, dado que a grande maioria tem a opinião de que o critério IAP* é menos importante que os demais. Porém, não haveria uma necessidade de limitar esta importância, como é feito atualmente. A diferenciação dos critérios dependeria da bacia em estudo, podendo estar explícito na metodologia de tomada de decisão do inventário que o IAP* é um critério de menor importância.

Por estas respostas, num primeiro momento, o ELECTRE IV, método que não requer a informação de importância entre os critérios, poderia parecer em desvantagem em relação aos demais métodos. Na atual metodologia do Estudo de Inventário, a consideração de um peso baixo no método da soma ponderada pode ser traduzido por uma menor importância daquele critério na tomada de decisão, ou seja, ter menor influência deste critério na decisão. Porém, como visto no capítulo 5, os valores dos parâmetros de indiferença e preferência também podem indicar uma maior ou menor influência do critério na tomada de decisão, uma vez que, informar valores maiores, aumenta a chance das alternativas serem indiferentes entre si para aquele critério. Esta abordagem não torna explícita a importância dos critérios, mas é uma opção para os critérios não serem considerados todos com mesma importância ou um critério poder influenciar menos na tomada de decisão.

- Pergunta 3: Consideração da alternativa AA

A terceira pergunta referiu-se a consideração da alternativa AA na tomada de decisão e, além das opções de “concordo”, “discordo” ou “não tenho opinião”, era possível também justificar ou fazer um comentário.

3. Na sua opinião, seria interessante considerar na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, uma alternativa referente a não exploração do potencial hidrelétrico da bacia (ou seja, gerar energia por outra(s) fonte(s) ou por hidrelétrica em outra bacia)?

- Concordo
- Discordo
- Não tenho opinião formada

Justificativa ou comentário sobre a pergunta anterior (opcional).

Sua resposta

Figura 39: Pergunta 3 do questionário completo.

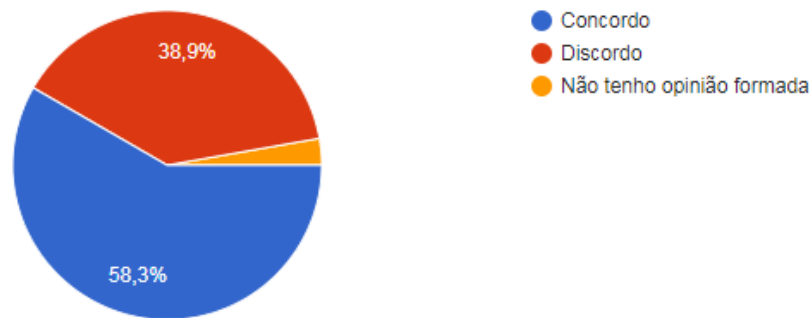


Figura 40: Respostas da pergunta 3 do questionário completo.

A maioria (58,3%) concordou em considerar tal alternativa e muitas ressalvas foram feitas tanto a favor, quanto contra.

Os que discordam e fizeram algum comentário nesta questão, entendem que o objetivo do Estudo de Inventário é dimensionar e estudar a melhor maneira de aproveitar o potencial hidrelétrico da bacia, cabendo aos estudos ambientais (onde entendo ser a viabilidade ambiental) definirem quanto a sua viabilidade. Discorreram também sobre a dificuldade intrínseca de se fazer tal comparação (da alternativa AA com as demais), principalmente no que tange ao cálculo dos índices dos critérios da alternativa AA. Ressalta-se que no questionário não foi dado nenhum detalhamento quanto a isso, então, acreditam não ser possível fazer um estudo para

as outras fontes com a mesma profundidade que um Inventário, para poder fazer tal comparação. Assim, não caberia ao Estudo de Inventário esta análise, mas sim, ao planejamento do setor. Esta afirmação é válida e, por ser considerada dentro do Estudo de Inventário, realmente não se espera realizar um estudo com mesma profundidade para as demais fontes, o que, atualmente, já é o papel de outro estudo dentro do planejamento do setor, como foi mencionado. O objetivo da alternativa AA é sinalizar a aptidão da bacia.

Das argumentações a favor, é interessante perceber que a maioria entende que esta é uma demanda da própria sociedade, principalmente quando um aproveitamento hidrelétrico é contestado, podendo o Estudo de Inventário já responder tal questionamento. Tanto o governo quanto a sociedade tem que ter consciência dos impactos que existem na escolha de uma fonte de energia que pode ser mais poluidora, em detrimento à uma fonte limpa. Foi possível identificar que na defesa quanto a consideração da alternativa AA existem dois lados. De um lado, uma preocupação quanto a diminuição do montante de hidrelétricas nos planos de expansão, então, considera-se importante o Inventário já apresentar tal comparação de modo a viabilizar estes aproveitamentos, de modo a serem opções para a expansão. Do outro lado, permitir que a opção de “não fazer nada” também seja uma alternativa para a bacia, de acordo com a sua aptidão. Houve quem defendesse explicitar a potencial perda de receita dos municípios com royalties, empregos e impostos pelo não aproveitamento do potencial energético da bacia, o que já é contabilizado no IAP, e continuará sendo no IAP*. Mas que devido a baixa importância deste critério, esta questão pode não ser tão determinante na decisão. Finalizando, sugeriu-se que esta comparação deveria ser realizada principalmente nos casos com elevados impactos socioambientais na bacia. Esta é uma sugestão interessante, não necessitando que esta análise fosse feita em todos os Estudos de Inventário, mas apenas naqueles que se julgar necessário, de tal modo a indicar a viabilidade “preliminar” ou não da exploração do potencial hidrelétrico da bacia. O termo “preliminar” foi empregado propositalmente de forma a deixar claro que não se pretende com esta comparação eliminar ou substituir nenhum outro estudo ou etapa que comprove a viabilidade do aproveitamento.

- Pergunta 4: Proposição de alteração na Análise Multiobjetivo

A quarta pergunta indagou o que o entrevistado proporia de alteração na atual tomada de decisão dos Estudos de Inventário. Alguns responderam incluir o impacto socioambiental negativo da complementação energética, principalmente, devido a equalização da quantidade de energia de cada alternativa (complementação energética) para cálculo do ICB, mas seu impacto não ser considerado. O que conta a favor do que está sendo proposto nesta tese em termos de novos critérios. Destacam-se, ainda, proposições quanto a consideração de emissões de gases de efeito estufa, adaptações a mudanças climáticas, contabilizar os benefícios do reservatório em termos de reservação da água em épocas de estiagem, permitir outros usos da água, aprisionamento de resíduos por sedimentação e regularização, e incluir restrições de viabilidade de aproveitamentos como a de produção energética por área alagada (talvez não por reservatório, mas para a cascata, uma vez que um reservatório maior pode viabilizar reservatórios menores a jusante). Foram relatadas, também, preocupações quanto a subjetividade em informar, principalmente, os impactos negativos, de modo a interferir na seleção da melhor alternativa. Para isso, foi sugerido utilizar avaliações qualitativas. Mas, o maior destaque das respostas ficou por conta do benefício que os aproveitamentos hidrelétricos fornecem em termos de armazenamento de energia. Esta questão deve ter sido evidenciada, principalmente, por que a pergunta anterior do questionário fazia menção a comparação de alternativas de exploração do potencial hidrelétrico da bacia com a sua não exploração, induzindo ao entrevistado querer explicitar um dos principais benefícios dos aproveitamentos hidrelétricos na tomada de decisão. De todo modo, esta questão é relevante, principalmente se em uma mesma bacia existirem alternativas com grandes reservatórios e alternativas somente de usinas a fio d'água. Privilegiar alternativas que consigam armazenar um maior volume de água seria interessante.

7. ANÁLISE FINAL DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIO

De acordo com a literatura, a escolha do método mais apropriado é um dos problemas mais difíceis que o analista se confronta em tomadas de decisão multicritério. Os métodos identificados como promissores no capítulo 4 desta tese, o VIP Analysis e os ELECTREs III e IV, cujos resultados foram apresentados no capítulo 5, demonstraram ser capazes de serem aplicados e obter resultados coerentes para o problema de tomada de decisão proposto. Ou seja, se mostraram realmente potenciais candidatos a métodos a serem utilizados nos Estudos de Inventário. Ainda no capítulo 5 foi feita uma comparação dos resultados dos três métodos, cujas diferenças evidenciaram as características de cada método, principalmente em termos de compensação de critérios. Porém, a escolha do método mais apropriado não deve levar em consideração apenas a comparação de resultados, conforme comentado no capítulo 6. O objetivo deste capítulo é tentar indicar, dentre os métodos identificados como promissores, aquele que seria o mais apropriado a ser utilizado nos Estudos de Inventário.

A partir de POHEKAR et al. (2004) entende-se que os métodos multicritério permitem uma melhor compreensão das características inerentes ao problema de decisão, impulsionam a função dos participantes no processo de tomada de decisão e facilitam as decisões coletivas. Portanto, os métodos devem ser vistos como ferramentas para aprofundar o problema de decisão, explorando possibilidades, interpretando-as, debatendo e argumentando, ao invés de uma ferramenta capaz de simplesmente tomar a decisão. Esta lógica possibilita uma maior participação dos diversos atores envolvidos na tomada de decisão. Assim, deve-se ter em mente que não se espera que o método a ser escolhido descubra uma boa aproximação de uma decisão objetivamente melhor, levando em conta um sistema de preferência pré-existente do tomador de decisão, mas sim, espera-se que forneça ao tomador de decisão um resultado obtido pelo método de raciocínio adotado, consistente com as hipóteses consideradas (ROY, 1999). Considerando este ponto de vista, tanto o VIP Analysis quanto o ELECTRE são capazes de realizar este aprofundamento do problema, principalmente durante a escolha dos parâmetros requeridos pelos métodos. Adicionalmente, os resultados fornecidos pelo VIP permitem que a decisão seja tomada considerando diferentes abordagens.

Por conta desta problemática, alguns autores formularam questões-chave para ajudar nesta escolha, que levam em conta aspectos do próprio processo de decisão, bem como, da cooperação entre o analista e o tomador de decisão. No capítulo 4 foram apresentados os aspectos propostos por POLATIDIS et al. (2006), a saber:

- Operacionalização das questões de sustentabilidade (forte ou fraca), associada ao grau de compensação do método (total ou parcial).
- Modelagem das preferências dos decisores, referente a informação requerida pelo método para expressar a importância dos critérios.
- Características técnicas, associadas ao tipo (quantitativo ou qualitativo), quantidade e natureza dos dados de entrada dos métodos.
- Tratamento das incertezas.
- Considerações de ordem prática, relacionadas a facilidade de uso, capacidade máxima em termos de número de critérios, alternativas, baixo requisitos financeiro e de tempo, interpretação direta dos parâmetros e quantidade.

Naquele momento, os métodos candidatos propostos nesta tese ainda não haviam sido escolhidos, de tal modo, que estas questões não foram utilizadas para comparar qual dos métodos candidatos é o mais apropriado ou preferível.

Analisando estas questões, o método ELECTRE IV fica em desvantagem em relação aos demais, principalmente por não permitir informar explicitamente a importância relativa entre os critérios. No caso dos Estudos de Inventário, já existe uma preferência muito clara dos critérios ICB e IAN em relação ao IAP, comprovada pela recomendação do Manual de Inventário em limitar o peso do critério IAP em 0,25. Mesmo com a alteração dos critérios IAN e IAP proposta nesta tese, o critério IAP* continua sendo menos importante em relação ao ICB e IAN*, conforme os resultados dos questionários apresentados no capítulo 6, onde 80% dos especialistas confirma esta afirmação. Adicionalmente, pelo questionário completo, observou-se que dos entrevistados que preferem informar os parâmetros de indiferença e preferência ao invés de intervalo de pesos ou pesos específicos, apenas 12% preferem não informar nada quanto a importância relativa dos critérios. O que indica uma preferência do ELECTRE III em relação ao ELECTRE IV.

Ainda em relação a questão das informações necessárias, os resultados do questionário completo, conforme discutido no capítulo 6, mostram que a maioria dos entrevistados preferem informar os dados de entrada do ELECTRE III em relação ao VIP, porém não foi avaliado se o respondente tinha algum conhecimento a respeito de métodos multicritério, o que não permite avaliar a facilidade que o tomador de decisão teria em obtê-la ou exprimi-la.

Aprofundando ainda mais esta discussão quanto a escolha do método mais apropriado, ROY et al. (2013) definiram que a questão crucial é o tipo de resultado que se espera obter do método, de tal maneira que este elabore respostas relevantes para as perguntas feitas pelo tomador de decisão. O tipo de resultado é uma característica que distingue os diversos métodos de decisão multicritério. Dependendo do contexto de decisão, um tipo específico de resultado pode trazer informações úteis capazes de guiar a decisão, auxiliar o processo da maneira correta e elaborar conclusões e até mesmo recomendações. Foram caracterizados cinco tipos principais de resultados, dos quais podemos identificar o VIP e a soma ponderada como tipo 1, onde um valor numérico é atribuído para cada potencial alternativa, e o ELECTRE III como tipo 2, onde um conjunto de alternativas são hierarquizadas, sem associar um valor numérico a cada uma delas. Ambos os tipos de resultado podem ser utilizados na tomada de decisão dos Estudos de Inventário, cujo objetivo é selecionar a melhor alternativa, assim, uma ordenação atribuindo valor numérico ou não às alternativas, irá funcionar.

Num primeiro momento, pode parecer mais conveniente escolher um método do tipo 1, principalmente, por que a atual metodologia dos Estudos de Inventário (soma ponderada), é classificada como tipo 1, uma vez que é calculado para cada alternativa o Índice de Preferência Modificado, para posterior hierarquização das mesmas. Manter uma atribuição numérica para hierarquização das alternativas poderia evitar um estranhamento inicial por conta dos tomadores de decisão, o que contaria a favor do VIP Analysis. Por outro lado, na tomada de decisão dos Estudos Preliminares, onde são selecionadas as alternativas mais atraentes para seguirem para os Estudos Finais, não é atribuído valor numérico às alternativas. Nesta fase são selecionadas as alternativas pareto ótimo.

De qualquer forma, obter um valor numérico para cada alternativa auxilia na tomada de decisão, uma vez que é possível identificar se a melhor alternativa está muito próxima

(ou não) da segunda melhor. Não atribuir um valor numérico dificulta esta análise, pois não se sabe qual a “distância” ou diferença entre uma alternativa e aquelas imediatamente superior e/ou inferior na ordenação. A única informação obtida é que uma é melhor que as demais.

Ainda associada a esta primeira questão, ROY et al. (2013) consideram que existem cinco questões-chave a serem contempladas, das quais destacam-se como mais relevantes para esta tese: (i) A simplicidade ou dificuldade em obter as informações de preferência que o método requer; (ii) Se o método permite levar em consideração parte da imprecisão, incerteza ou indeterminação na definição dos desempenhos das alternativas; e (iii) Aceitabilidade quanto a compensação de um desempenho ruim em determinado critério por um bom desempenho em outro.

Estas questões já foram comentadas anteriormente, pois correspondem a questões relevantes indicadas também por POLATIDIS et al (2006). Considerando estas questões para comparar os métodos VIP e ELECTRE III, não se chega a uma preferência em termos de método. Quanto a dificuldade das informações de preferência, o VIP possibilita informar a preferência dos critérios pelo intervalo de peso dos critérios (como nos casos 2A a 2C) ou por meio de restrições (como no caso 2X). No caso do intervalo de pesos, os tomadores de decisão de Estudos de Inventário já estão acostumados a informar pesos relativos para os critérios, mas indicar a preferência por meio deste intervalo pode não ser uma tarefa muito simples. Porém, utilizar restrições facilita este trabalho. No caso do ELECTRE III a preferência dos critérios é informada pelo peso, cujo significado não é tão evidente quanto o peso dos métodos de único critério, que tem um significado claro de *trade-off*, conforme explicitado por POLATIDIS et al. (2006), o que pode dificultar sua definição. Quanto à imprecisão, no ELECTRE é considerada por meio da classificação de preferência estrita, fraca ou indiferentes quando duas alternativas são comparadas, ou seja, o método permite que alternativas com desempenhos diferentes sejam consideradas indiferentes. No caso do VIP, a possibilidade de utilizar intervalo de pesos permite ser mais ou menos restritivo na consideração do critério na decisão final, a análise para escolha da melhor alternativa é realizada considerando diferentes informações e trata-se de um método interativo, onde o tomador de decisão pode se familiarizar com o problema ao longo do processo antes da decisão final. Quanto a compensação, a escolha de qualquer um dos métodos propostos nesta tese já seria melhor do que o método atual, da soma ponderada, uma vez que para

este último a escolha da melhor alternativa é feita compensando o desempenho dos critérios. No caso do ELECTRE, ele é considerado como não-compensatório e no caso do VIP, apesar de ser um método compensatório, a tomada de decisão considera diferentes pontos de vista do desempenho das alternativas, não sendo tão direta esta compensação entre critérios.

Analisando estas questões ainda não é possível definir claramente o método mais apropriado para os Estudos de Inventário. ROY et al. (2013) desenvolveram, então, a partir destas questões principais, as chamadas questões secundárias, que também são relevantes no processo de escolha do método mais apropriado. Destas questões, uma se destaca por apresentar uma fragilidade de um método em relação ao outro, trata-se da questão: O método é capaz de satisfazer plenamente a necessidade de compreensão por parte dos tomadores de decisão?

POLATIDIS et al. (2006) também consideraram esta questão intitulada como facilidade de uso, identificando que os métodos ELECTRE e AHP tem desvantagem em relação aos demais. Isto é uma realidade, apesar de existirem artigos detalhando a metodologia de solução dos métodos, o entendimento do método ELECTRE não é intuitivo e demanda um maior tempo e experiência com o tema multicritério por parte do tomador de decisão para o completo entendimento. Por outro lado, o VIP apresenta metodologia de fácil entendimento, permitindo ao tomador de decisão, que não é especialista em multicritério, entender facilmente o resultado obtido e as consequências no resultado devido alterações nos dados de entrada. Existe uma maior facilidade em reproduzir os resultados do VIP do que do ELECTRE, mesmo não utilizando os respectivos *softwares* desenvolvidos por seus criadores.

Por fim, salienta-se que a discussão apresentada neste capítulo tem como objetivo indicar um método mais apropriado para a tomada de decisão final dos Estudos de Inventário, apesar dos métodos VIP Analysis e ELECTRE III serem potenciais candidatos a utilização nestes Estudos.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado no capítulo 1, esta tese tem como objetivo principal a proposição de uma nova abordagem para a análise multiobjetivo⁹ dos estudos finais dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de bacias hidrográficas, que se desdobra em três objetivos específicos:

- Propor uma metodologia para quantificação do benefício ambiental proveniente da implantação de aproveitamentos hidrelétricos;
- Incorporar na análise multiobjetivo final dos Estudos de Inventário dois novos critérios, de modo que a decisão quanto a melhor alternativa de divisão de quedas considere também o impacto socioambiental fora da bacia e o benefício ambiental na bacia; e
- Propor método multicritério de apoio a decisão nos estudos finais do Inventário, alterando o atual método da soma ponderada, de forma a mitigar a dificuldade de definição de pesos específicos para os critérios, agravada com a inclusão dos dois novos critérios.

A partir destes objetivos específicos e levando em consideração as etapas do processo de decisão multicritério segundo POHEKAR et al. (2003), conforme Figura 1 do capítulo 1 desta tese, identifica-se que as etapas relacionadas a estes objetivos e que foram discutidas nesta tese referem-se a “seleção de critérios” e “seleção do método de decisão”. Assim, a dita nova abordagem proposta nesta tese pode ser dividida em duas partes, sendo os dois primeiros objetivos específicos relacionados a “seleção de critérios” e o terceiro objetivo relativo a “seleção do método de decisão”.

Com relação a etapa de “seleção de critérios”, conforme visto no capítulo 2, a tomada de decisão dos Estudos de Inventário já considera três critérios: índice custo-benefício (ICB), impacto socioambiental negativo dentro da bacia (IAN) e impacto socioambiental positivo (IAP), que considera impactos positivos mais relacionados a socioeconomia do que ambientais. No capítulo 3 foi proposta a inclusão de mais dois novos

⁹ Salienta-se que esta tomada de decisão refere-se à uma análise multicritério, porém, o termo multiobjetivo está sendo utilizado por referência ao Manual de Inventário, cuja etapa de seleção final da melhor alternativa é denominada “análise multiobjetivo final”.

critérios nesta tomada de decisão, a saber: impacto socioambiental negativo fora da bacia e o benefício ambiental.

O primeiro critério proposto, impacto socioambiental negativo fora da bacia, é uma contribuição de um estudo desenvolvido pelo CEPEL (MATOS et al., 2013) (RAUPP et al., 2015), que mostrou a importância de se considerar este impacto que está associado a produção de energia que deixou de ser gerada pelas usinas hidrelétricas da alternativa dentro da bacia (complementação energética). O custo da geração da complementação energética já é considerado no cálculo do critério ICB, uma vez que pode alterar a tomada de decisão. Da mesma forma, o impacto da complementação energética pode também não ser desprezível, sendo importante sua avaliação e incorporação na escolha da melhor alternativa. O objetivo desta consideração é explicitar que ao abrir mão de um potencial hidrelétrico eficiente sob o ponto de vista econômico-energético, em um país que a demanda de energia ainda é crescente, está se optando por produzir a mesma quantidade de energia por meio de outra fonte, ou em outra bacia hidrográfica, o que também produz impactos socioambientais específicos. A metodologia de cálculo deste impacto desenvolvida pelo CEPEL foi apresentada no capítulo 3, bem como, foi definida a abordagem de incorporação deste novo impacto, dentre as opções apresentadas por CEPEL.

O segundo critério proposto, benefício ambiental, está associado aos benefícios dos futuros projetos hidrelétricos que, dada as características dos locais remanescentes de potencial hidrelétrico a ser explorado (áreas com características ambientais relevantes), desempenhará um novo papel associado a um vetor de conservação ambiental, além de sua atuação como vetor de desenvolvimento socioeconômico local. No capítulo 3 foram definidas as propostas de metodologias desenvolvidas nesta tese relativas à quantificação deste novo critério e sua incorporação na tomada de decisão.

Com relação a etapa de “seleção do método de decisão”, associado ao terceiro objetivo específico desta tese, no capítulo 4, a partir da revisão bibliográfica de métodos multicritério, foram identificados três potenciais candidatos de métodos a serem utilizados na análise multiobjetivo final, a saber: VIP Analysis, ELECTRE III e ELECTRE IV.

No capítulo 5 foi apresentado um estudo de caso, baseado em um Estudo de Inventário real, utilizado para cálculo dos novos critérios (IAN* e IAP*) e aplicação dos quatro métodos multicritério, o atualmente utilizado nos Estudos de Inventário conforme o Manual de Inventário (soma ponderada) e os três potenciais métodos identificados no capítulo 4. Para cada método proposto, foram realizados diversos casos considerando os critérios ICB, IAN* e IAP* e alterando-se os parâmetros requeridos pelo método. Dos resultados obtidos, foram selecionados dois casos para posterior comparação entre métodos, o que obteve ordenação mais próxima do Estudo de Inventário (caso referência) e o mais representativo de cada método. Esta comparação foi apresentada no final do capítulo 5.

Como a escolha do método multicritério mais apropriado não pode se basear apenas na comparação dos resultados dos métodos, no capítulo 6 foram apresentadas as respostas obtidas nos dois questionários distribuídos com o objetivo de incluir a opinião dos especialistas/decisores nesta escolha. O questionário também avaliou se os especialistas/decisores concordavam em incluir nos Estudos de Inventário uma alternativa adicional (alternativa AA) que representaria a não-exploração do potencial hidrelétrico da bacia, discutida no capítulo 3. A inclusão desta alternativa torna-se interessante com a incorporação do impacto socioambiental negativo fora da bacia na tomada de decisão.

No capítulo 7 foi apresentada uma discussão mais ampla sobre qual o método multicritério seria o mais apropriado para os Estudos de Inventário.

Com relação à incorporação do impacto socioambiental negativo fora da bacia, a sua consideração neste estudo de caso não alterou a ordenação das alternativas, sendo explicado pelos altos impactos das alternativas, superiores ao valor do IAEXP (índice representativo do impacto socioambiental fora da bacia da expansão da geração). A aplicação deste critério em outros Estudos de Inventário reais mostrou que faz diferença a consideração do impacto da complementação energética. O valor do IAEXP está vinculado ao Planejamento da Expansão da Geração, e deve ser revisto a cada publicação de um novo Plano Nacional de Energia (PNE). O utilizado nesta tese está associado ao PNE 2030 (plano mais recente na época da elaboração desta tese), considerando o último quinquênio do planejamento. Ressalta-se que o valor deste índice foi obtido a partir de um estudo preliminar, e que para a sua real utilização como representativo do impacto fora da bacia

da expansão da geração, é necessária uma discussão mais ampla envolvendo diversas entidades do setor e posterior cálculo do valor oficial a ser utilizado. Uma vez oficializado este índice, sua definição deveria utilizar a mesma base de cálculo do CUR (custo unitário de referência), em termos de horizonte e configuração do sistema, por exemplo, pois os dois valores referem-se a mesma complementação energética, sendo um relacionado ao custo e o outro ao impacto.

Quanto à incorporação do Benefício Ambiental, apesar de não ter alterado significativamente a hierarquização das alternativas, pode-se observar uma diminuição do Índice de Preferência Modificado (utilizado para escolha da melhor alternativa) das alternativas para os casos que se considerou o critério adicional de Benefício Ambiental, o que indica um melhor desempenho destas alternativas. Ressalta-se que no estudo de caso utilizou-se o critério de definir áreas protegidas de pelo menos o tamanho da área alagada pelo reservatório do projeto. Como as alternativas possuem áreas alagadas muito próximas, não foi possível diferenciar muito as alternativas em termos de benefício ambiental. Além disso, este benefício está diretamente associado às características da bacia.

Outra possibilidade de critério para definir as áreas protegidas é estar vinculado não diretamente ao tamanho da área alagada do reservatório, mas, por exemplo, a um percentual de áreas prioritárias na área de drenagem da barragem. Seguindo a lógica de que quanto mais áreas prioritárias, maior relevância ambiental tem a área, então, mais áreas protegidas trará maior benefício ambiental para a bacia. Assim, os esforços seriam destinados às áreas realmente relevantes do ponto de vista ecológico.

De todo modo, a maior contribuição é desenvolver alternativas com forte viés de conservação ambiental, o que é essencial para a implantação de futuros projetos hidrelétricos no Brasil. O estímulo à busca por alternativas mais sustentáveis, requer a adequada avaliação deste tipo de alternativa, através da incorporação deste benefício na tomada de decisão, o que, resulta em um planejamento da expansão hidrelétrica mais sustentável.

Em termos de métodos multicritério, com relação ao primeiro método proposto, VIP Anlysis, os resultados das aplicações mostraram que o VIP é uma ferramenta interessante e muito promissora a ser utilizada nos Estudos de Inventário. Este método possui, pelo

menos, duas vantagens em relação ao método atual (soma ponderada). A primeira está relacionada à informação requerida pelo método, que utiliza intervalo de pesos e restrições destes pesos entre os critérios, e não pesos específicos, ou seja, o decisor tem meios de considerar suas limitações e/ou preferências. O segundo é que a própria metodologia de escolha da melhor alternativa já permite buscar uma alternativa mais robusta, pois o método considera uma gama de informações para a tomada de decisão e a escolha é feita de forma interativa, estando de acordo com a recomendação do Manual de Inventário de buscar a alternativa mais robusta.

Em geral, os resultados do VIP coincidiram com o resultado do Estudo de Inventário em termos de melhor e pior alternativas. Quanto à definição dos valores do intervalo de pesos, devem ser tomados alguns cuidados, pois utilizar o máximo intervalo possível (pesos entre 0 e 1), poderá ser considerado peso igual a zero para um dos critérios, o que seria equivalente a descartar o critério da análise, ou considerar peso igual a um para um dos critérios, o que significa solucionar o problema considerando apenas um critério, o que não seria desejável nos Estudos de Inventário.

Com relação ao segundo método proposto, ELECTRE III, os resultados também indicaram ser um método promissor para sua utilização nos Estudos de Inventário. O método ordena as alternativas (permitindo identificar a melhor alternativa) e, diferentemente do método da soma ponderada, não necessita da informação de pesos específicos que compensem o desempenho de um critério pelo de outro (*trade-off*), mas sim, utiliza informações referentes aos parâmetros de indiferença, preferência e veto. A escolha destes parâmetros deve ser feita de forma criteriosa, pois refletem os limites para os quais os tomadores de decisão consideram que não há diferença entre alternativas ou uma preferência muito forte entre duas alternativas para um determinado critério. Num primeiro momento, não seria indicado utilizar valores muito elevados para os parâmetros, pois dificulta a diferenciação das alternativas, porém, caso estes parâmetros realmente reflitam a opinião dos tomadores de decisão, o possível empate entre alternativas é uma informação relevante para a decisão no Estudo de Inventário. Como no Inventário é necessário escolher uma única alternativa, o desempate poderá ser feito restringindo os parâmetros de forma a permitir diferenciar as alternativas ou utilizando critérios adicionais associados, por exemplo, à facilidade de implantação dos projetos por conta do licenciamento

ambiental. O mesmo raciocínio pode ser utilizado no caso de incomparabilidade entre as alternativas mais preferíveis.

Com relação à definição dos parâmetros de preferência e indiferença, nesta tese foi sugerido utilizar como parâmetros iniciais medidas do desvio-padrão de cada critério, de modo a considerar a variabilidade do desempenho das alternativas e, a partir dos resultados, o tomador de decisão, conhecendo melhor o problema, definir parâmetros mais condizentes com a bacia em estudo. Também foram sugeridas maneiras de se tratar estas informações iniciais em estudos em que uma alternativa tenha desempenho muito diferente das demais, o que pode atrapalhar a diferenciação das alternativas quando se utiliza medidas como o desvio-padrão. O método permite ainda diferenciar os critérios por meio de pesos, que não funcionam como *trade-off*.

Com relação ao terceiro método proposto, ELECTRE IV, apesar de ser muito parecido com o ELECTRE III, ele não requer informação quanto ao peso entre critérios, o que dificulta a explicitação das preferências do tomador de decisão quanto aos critérios. Neste caso, é possível indicar uma preferência entre os critérios indiretamente por meio da escolha dos valores dos parâmetros, de tal modo que um critério de menor importância tenha parâmetros maiores, dificultando a diferenciação das alternativas por este critério, tendo menor influência na tomada de decisão. Porém, esta forma de expressar a preferência não é trivial e nem transparente para o processo de tomada de decisão. Por este motivo, após as aplicações, considerou-se que este método não é o mais indicado para ser utilizado em Estudos de Inventário, visto que nestes estudos já existe uma forte recomendação e clara preferência dos critérios ICB e IAN* em relação ao IAP*.

De acordo com ROY et al. (2013), a escolha do método multicritério mais apropriado não pode se basear apenas na comparação de resultados obtidos, assim, nesta tese considerou-se pertinente incluir a opinião dos especialistas/decisores nesta escolha. Foram, então, distribuídos dois questionários, cujos resultados foram apresentados e discutidos no capítulo 6, dos quais destacam-se:

- a relevância do método multicritério permitir diferenciar a importância dos critérios, principalmente por que o critério IAP* é considerado menos importante que os demais (porém sem necessidade de limitar esta importância, como é feito

atualmente);

- a preferência por métodos que demandem informação quanto a parâmetros de indiferença e preferência ao invés de peso entre critérios;
- a concordância em considerar a alternativa AA nos Estudos de Inventário, referente a não-exploração do potencial hidrelétrico da bacia.

O primeiro destaque do resultado do questionário, acima apresentado, corrobora a conclusão de que o ELECTRE IV não é o método mais indicado para os Estudos de Inventário. O segundo destaque indica uma preferência pela informação requerida pelos métodos ELECTRE, embora não tenha sido abordado no questionário o prévio conhecimento de métodos multicritério pelo especialista, de tal modo que este consiga realmente avaliar a informação menos trabalhosa de se obter, conforme discutido no capítulo 6. O terceiro destaque evidencia o que já havia sido sugerido em CEPTEL et al. (2012) e por esta tese, da relevância de se considerar a alternativa referente a não-exploração do potencial hidrelétrico da bacia, com o objetivo de avaliar sua real aptidão para geração de energia. A consideração desta alternativa pode ajudar no prosseguimento do processo de implantação dos projetos da alternativa vencedora do Inventário, uma vez que a questão da aptidão da bacia já terá sido respondida desde o Inventário.

Por fim, no capítulo 7 foi realizada uma análise comparativa dos métodos aplicados com o intuito de indicar um método mais apropriado para a tomada de decisão final dos Estudos de Inventário. Os métodos VIP Analysis e ELECTRE III apresentaram resultados satisfatórios considerando grande parte das questões associadas a escolhas de métodos multicritério. Porém, foi identificada uma vantagem do VIP em relação ao ELECTRE III, relacionada a facilidade de entendimento da metodologia e reprodução dos resultados. Sendo o VIP, o método mais indicado para a decisão final dos Estudos de Inventário, de acordo com as análises realizadas nesta tese.

Salienta-se, entretanto, que a alteração oficial do método multicritério, bem como a incorporação dos critérios propostos, só podem ser viabilizadas a partir de uma revisão do atual Manual de Inventário, de modo que nesta discussão sejam incluídos os diversos órgãos competentes e importantes para tal ação. Outra opção seria fazer tais alterações por meio de consultas públicas ou portarias, principalmente nos pontos que já são consenso, como a consideração do impacto fora da bacia.

O passo seguinte à atualização do Manual de Inventário é a revisão de Estudos de Inventário já realizados, principalmente os mais antigos, pois alguns foram aprovados antes do Manual de 1997, conforme relatado por CARVALHO (2015). Assim como a própria dinâmica da bacia, os aprimoramentos metodológicos, podem influenciar diretamente tanto na definição dos projetos e das alternativas quanto na tomada de decisão. Assim como recomendado por CARVALHO (2015), a vigência dos Estudos de Inventário é um assunto muito importante a ser discutido, bem como, a priorização dos Inventários que deveriam ser revistos.

Finalmente, o objetivo desta tese é propor uma nova abordagem para a tomada de decisão final dos Estudos de Inventário, ou seja, para a escolha da melhor alternativa dos Estudos Finais. Ressalta-se que a tomada de decisão dos Estudos Preliminares, onde são selecionadas as alternativas mais promissoras para passarem para os Estudos Finais, não foi objeto de análise nesta tese. Assim, a proposição de alteração do método multicritério aqui proposto não inclui a alteração do método multicritério dos Estudos Preliminares. Acredita-se que, o atual método para seleção das alternativas mais interessantes dos Estudos Preliminares é apropriado, uma vez que não demanda nenhuma informação adicional por parte do tomador de decisão e não é feita agregação dos índices dos critérios. A seleção considera puramente o desempenho das alternativas nos critérios, de modo que serão desconsideradas nos Estudos Finais as alternativas com desempenho ruim simultaneamente nos dois critérios atualmente considerados, o ICB e o IAN. Porém, para que a tomada de decisão dos Estudos Preliminares e a dos Estudos Finais tenham coerência, recomenda-se que nos Estudos Preliminares também seja substituído o critério IAN pelo IAN*, conforme proposto nesta tese para os Estudos Finais. A princípio, como não é foco desta tese os Estudos Preliminares, não é sugerido considerar o critério IAP* nos Estudos Preliminares, uma vez que teria que ser avaliada a possibilidade do atual método de seleção das alternativas (pareto ótimo) permitir considerar três critérios ao invés de dois, o que passaria da visualização em duas dimensões para três dimensões.

Apesar das proposições apresentadas nesta tese este assunto não se esgota nestas discussões. Futuros trabalhos associados ainda a aprimoramentos dos Estudos de Inventário podem considerar as seguintes possibilidades, dentre outras:

- Incorporação do conceito de usinas reversíveis na elaboração dos projetos e alternativas. Para a correta consideração deste tipo de usina, estas deveriam ser incluídas desde o início do planejamento do aproveitamento do potencial hidrelétrico da bacia, porém, existem algumas dificuldades, como por exemplo o cálculo do benefício energético que nos Estudos de Inventário que é obtido por simulação mensal, enquanto que para a avaliação dos benefícios energéticos das usinas reversíveis deveria considerar simulações em intervalos menores, exemplo horário;
- Proposição de metodologia com o intuito de reduzir a subjetividade na definição dos impactos socioambientais negativos;
- Proposição de metodologia de modo a privilegiar alternativas que possuam maior armazenamento de energia, visando incentivar reservatórios de regularização;
- Revisão de parâmetros utilizados nos Estudos de Inventário, como o período crítico, com possibilidade de utilização de período crítico probabilístico. Estudos vem sendo feitos para sua consideração no cálculo da garantia física (MACEIRA *et al.*, 2018b);
- Consideração dos temas mudanças climáticas e resiliência, não só nos Estudos de Inventário, como também, nos Estudos de Viabilidade.

Por fim, espera-se que a discussão quanto a consideração de métodos multicritério venha incentivar e trazer experiência para os demais estudos do setor, que vem buscando incorporar a dimensão ambiental na tomada de decisão (MEDEIROS *et al.*, 2019) e tornando-se multicritério (JUSTINO *et al.*, 2018), de modo a melhor aproveitar as ferramentas hoje disponíveis.

9. BIBLIOGRAFIA

- ACOLET, T., 2008, “Modelo de análise de crédito fundamentado no ELECTRE TRI”. Dissertação de Mestrado Profissionalizante apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração das Faculdades Ibmecc.
- ALBUQUERQUE, L.L., ALMEIDA, A.T., CAVALCANTE, C.A.V., 2009, “Aplicabilidade da programação matemática multiobjetivo no planejamento da expansão de longo prazo da geração no Brasil”, *Pesquisa Operacional*, vol. 29 nº 1, Rio de Janeiro.
- ALMEIDA, A. T. de, 2011, “O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão”, 2ª. Edição, Editora Universitária, Recife.
- ANEEL, 2019, “Banco de Informações de Geração (BIG)”. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: Agosto/2019.
- ANTUNES, C., ALVES, M., 2012, “Programação linear multiobjetivo - métodos interativos e software”, In: Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- AZEVEDO, M.C.; COSTA, H.G., 2001, “Metodologia Multicritério para a Avaliação da Competitividade”, In: XXV ENANPAD .Campinas, SP.
- BANA e COSTA, C. A., CORTE, J. M., VANSNICK, J. C., 2005, “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.
- BRANS, J. P., VINCKE, P. H., MARESCHAL, B., 1986, “How to select and how to rank projects: the promethee methods”. *European Journal of Operational Research*, v. 24, n. 2, p. 228-238.

BRASIL, 2012, “Lei nº 12651, de 25 de maio de 2012”. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acessado em: Fevereiro/2019.

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

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

CANAMBRA, 1963, “Power Study of South Central Brazil”. Nassau, Bahamas.

CARVALHO, A.R.L. de, 2015, “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.

CEPEL, 1997a, “Metodologia para seleção de alternativas de divisão de quedas de bacias hidrográficas considerando aspectos sócio-ambientais”, Relatório Técnico nº 069/97 DPP/POG. Rio de Janeiro.

CEPEL, 1997b, “Aplicação da metodologia para análise integrada de impactos de usinas hidrelétricas ao trecho médio do Rio Tocantins – 2º caso-teste”, Relatório Técnico nº 381/97 DPP/POG. Rio de Janeiro.

CEPEL, 1998, “Metodologia para análise integrada de impactos de usinas hidrelétricas: consolidação dos conceitos e procedimentos”, Relatório Técnico nº 289/98 DPP/PEL. Rio de Janeiro.

CEPEL, 2012, “Proposta Metodológica para a consideração do Impacto Socioambiental Negativo do Não-Aproveitamento de Potenciais Hidrelétricos Economicamente Atrativos em Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas – Detalhamento”, Relatório Técnico nº 39654/2012. Rio de Janeiro.

- CEPEL, 2016, “Metodologia para o Desenvolvimento e Implantação de Projetos de Usinas Hidrelétricas sob o Conceito de Usinas-Plataforma”, Relatório Técnico nº 11662/2016, disponível em: < <http://www.mme.gov.br/web/guest/projetos/meta/documentacoes> >. Rio de Janeiro.
- CEPEL, 2018, “Apostila de Treinamento do Sistema SINV versão 6.2.0”, Relatório Técnico. Rio de Janeiro.
- CHAVES, M.C.C., RAMOS, T.G., de BARROS, T.D., de MELLO, J.C.C.B.S., 2010, “Uso Integrado de Dois Métodos de Apoio à Decisão Multicritério: VIP Analysis e Macbeth”, Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, Rio de Janeiro, v.2, n.2, p. 89-99.
- CLÍMACO, J. C. N., ANTUNES, C. H., ALVES, M. J. G., 2003, “Programação Linear Multiobjetivo: Do Modelo de Programação Linear Clássico à Consideração Explícita de Várias Funções Objetivo”. Coimbra, Portugal, Universidade de Coimbra.
- CLÍMACO, J.C.N., 2004, “A critical reflection on optimal decision”, European Journal of Operational Research, n. 153, p. 506-516.
- CONDE, M.R., 2013, “Incorporação da dimensão ambiental no planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica por meio de técnicas multicritério de apoio a tomada de decisão”, Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Programa de Planejamento Energético.
- 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., 2006, “Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas – Revisão do Manual”. In: X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão do Sistema Elétrico.
- COSTA, F.S., MATOS, D.F., GARCIA, K., PAZ, L.R.L., RAUPP, I.P., MEDEIROS, A., SILVA, M., DAMAZIO, J.M., MACEIRA, M.E., MELO, A., SANTOS, M.A., PETTENÁ,

- L., 2017a, “Uma Proposta para o Desenvolvimento Sustentável da Hidroeletricidade”. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- COSTA, F., MEDEIROS, A., MATOS, D., RAUPP, I., DAMAZIO, J., GARCIA, K., PAZ, L., SILVA, M., MACEIRA, M., MELO, A., MOYA, C., PETTENÁ, J., MAGRINI, A., SANTOS, M., BREDARIOL, C., LIMA, G., VEIGA, L., JUNIOR, O., 2017b, “Proposta de Procedimentos e Metodologias para a Caracterização do Conceito de Usina-Plataforma”. In: XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.
- CUNHA, S.H.F., TOLMASQUIM, M.T., GUERREIRO, A., FARIAS, J.C.M., 2006, “Desafios da EPE no planejamento energético nacional”. In: X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica.
- DAMAZIO, J.M., COSTA, F.S., MARIEN, J.L., 1997, “Obtenção de Soluções de Compromisso no Planejamento do Desenvolvimento do Potencial Hidroelétrico de Grandes Bacias”. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- DIAS, L.C., CLIMACO, J.N., 2000, “Additive Aggregation with Variable Interdependent Parameters: the VIP Analysis Software”. *Journal of Operational Research Society* 51, p. 1070-1082.
- DIAS, L.C., CLIMACO, J.N., 2005, “Dealing with imprecise information in group multicriteria decisions: a methodology and a GDSS architecture”, *European Journal of Operational Research* 160, p. 291-307.
- ELETROBRAS, 1977, “Manual de Instruções para Estudos de Inventário de Bacia Hidrográfica para Aproveitamento Hidrelétrico”, Rio de Janeiro, Brasil.
- ELETROBRAS, 1984, “Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas”, Rio de Janeiro, Brasil.
- ELETROBRAS, 1997, “Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas”, Rio de Janeiro, Brasil.

- ELETROBRAS, 2017, “Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas”. Disponível em: < <https://www.eletronorte.com/elb/data/Pages/LUMIS4AB3DA57PTBRIE.htm>>. Acesso em: Fevereiro/2017
- ELETROBRAS, 2019, SIPO - Potencial Hidrelétrico Brasileiro 2017. Disponível em: <<http://www.eletronorte.com/elb/data/Pages/LUMIS21D128D3PTBRIE.htm>>. Acesso em: Fevereiro/2019
- ELETROBRAS/ELETRONORTE/CCORREIA/ODEBRECHT, 2007, “Atualização do Inventário Hidroelétrico da bacia Hidrográfica do rio Xingú”, Rio de Janeiro.
- EPE, 2007, “Plano Nacional de Energia – PNE 2030 – Informe à imprensa”. Rio de Janeiro.
- EPE/CNEC, 2010, “Relatório da Revisão dos Estudos de Inventário Hidroelétrico e AAI da bacia do rio Tibagi”, Rio de Janeiro.
- EPE/CNEC/ARCADIS, 2007, “Avaliação Ambiental Integrada dos Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia do Rio Tocantins – Relatório Final”, Rio de Janeiro.
- EPE/MME, 2007, “Plano Nacional de Energia 2030 – Documento Final”. Brasília-DF.
- EPE/MME, 2015, “Plano Nacional de Energia - Cenário econômico 2050”. Rio de Janeiro.
- FREITAS, A.L.P., PEIXOTO, F.S., SUETT, W.B., 2004, “Seleção de Equipamentos: Uma Análise Decisória Utilizando os Métodos Electre III-IV”, In: XXXVI SBPO, Minas Gerais.
- GARTNER, I. R., 2001, “Avaliação ambiental de projetos em bancos de desenvolvimento nacionais e multilaterais: evidências e propostas”. Editora Universa, Brasília.
- GEORGOPOULOU, E., LALAS, D., PAPAGIANNAKIS, L., 1997, “A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option”. *European Journal of Operational Research*, vol. 103, pp. 38-54. Elsevier.

- HUGANNARD, J., ROY, B., 1982 “Le Plan d’Extension du Metro em benlieue parisienne, um cas type d’application multicritère”. *Les Cahiers Scientifiques de la Revue Tansports*, vol. 6, pp. 77-108.
- JANSEN, S. J. T.; COOLEN, H. C. C.; GOETGELUK, R. W., 2011, “The Measurement and Analysis of Housing Preference and Choice”. *Springer Science+Business Media*.
- JUSTINO, T.C.; MELO, A.C.G., MACULAN, N., MACEIRA, M.E.P., 2018, “Consideração de emissões de gases de efeito estufa no planejamento de longo prazo da expansão da geração por meio de métodos de apoio à decisão multicritério”, In: XIX Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, Lima, Peru.
- KEENEY, R. L.; RAIFFA, H., 1993, “Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs”, Cambridge: Cambridge University Press, p. 569.
- LISBOA, M.L.V., MARZANO, L.G., SABOIA, C.H.M., MACEIRA, M.E.P., MELO, A.C.G., 2008, “A Mixed Integer Programming Model for Long Term Generation Expansion Planning of the Brazilian System”, In: Anais de XVI Power Systems Computation Conference, Glasgow.
- LOKEN, E., 2007, “Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 1584-1595.
- LÓPEZ, H.M.L., 2010, “Modelo Multicritério para Seleção de Projetos Estratégicos de uma Empresa de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco.
- MACEIRA, M.E.P., PENNA, D.D.J., DINIZ, A.L., PINTO, R.J., MELO, A.C.G., VASCONCELLOS, C.V., CRUZ, C.B., 2018a, “Twenty Years os Application of Stochastic Dual Dynamic Programming in Official and Agent Studies in Brazil – Main Features and Improvements on the NEWAVE model”, In: Anais de XX Power System Computation Conference, Dublin.

- MACEIRA, M.E.P., BATISTA, F.R.S., CERQUEIRA, L.F.E., OLASAGASTI, R.R., MELO, A.C.G., MARZANO, L.G.B., 2018b, "A Probabilistic Approach to Define the Amount of Energy to be Traded in Hydro Dominated Interconnected Systems", In: Anais de XX Power System Computation Conference, Dublin.
- MARIEN, J.L., 1996, "CONSENSUS: A Compromise Oriented Multi Criteria Method Suited for Decision Making in the Public Sector", Internal publication of the Center of Statistics and Operations Research, STOOTW/275. Vrije Universiteit Brussels, Bruxelas.
- MATOS, D.F., COSTA, F.S., RAUPP, I.P., PAZ, L.R., MEDEIROS, A.M., DAMÁZIO, J.M., SANTOS, G., GARCIA, K.C., 2013, "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.
- MEDEIROS, A.M., RAUPP, I.P., DAMÁZIO, J.M., COSTA, F.S., MATOS, D.F., LISBOA, M.L., GARCIA, K.C., PAZ, L.R., SILVA, M.T.M., SABOIA, C.H.M., PEREIRA, M.G., 2019, "Incorporação do custo da água e do carbono no planejamento energético de longo prazo". In: Anais do XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.
- MMA, 2004a, "Mapa das Áreas Prioritárias para a Conservação dos Biomas Brasileiros". Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/_arquivos/maparea.pdf. Consultado em: Fevereiro/2016.
- MMA, 2004b, Portaria nº 126, de 27 de maio de 2004. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/_arquivos/port126.pdf. Consultado em: Fevereiro/2016.
- MMA, 2004c, "Recomendações para as Áreas Prioritárias". Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/_arquivos/tabmapa.pdf. Consultado em Fevereiro/2016.

- MMA, 2018, Portaria nº 463, de 18 de dezembro de 2018. Disponível em: <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/55881195/do1-2018-12-19-portaria-n-463-de-18-de-dezembro-de-2018-55880954>. Consultado em: Fevereiro/2019.
- MMA, 2019, “Segunda atualização do Mapa das Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade”. Disponível em: <<http://areasprioritarias.mma.gov.br/2-atualizacao-das-areas-prioritarias>>. Consultado em: Fevereiro/2019
- MME, 2007, “Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas”. Rio de Janeiro: E-papers.
- MME, 2013, “Desenvolvimento de Aproveitamentos Hidrelétricos sob o Conceito de Usina-Plataforma”, Brasília.
- MME/EPE, 2015, “Plano Decenal de Expansão de Energia 2024”. Brasília.
- MME/EPE, 2018, “Plano Decenal de Expansão de Energia 2027”. Brasília.
- MOREIRA, R.A., 2007, “Análise Multicritério dos Projetos do SEBRAE/RJ através do Electre IV”, Dissertação de mestrado – Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Programa de Pós-graduação e Pesquisa em Administração e Economia.
- OLSON, D.L., 2001, “Comparison of three multicriteria methods to predict known outcomes”, *European Journal of Operational Research*, n. 130, p. 576-587.
- OREE, V., HASSEN, S.Z.S., FLEMING, P.J., 2017, “Generation expansion planning optimization with renewable energy integration: A review”, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 69, pp. 790-803. Elsevier.
- POHEKAR, S.D., RAMACHANDRAN, M., 2004, “Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review”. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, vol. 8, pp. 365-381. Elsevier.

- POLATIDIS, H., HARALAMBOPOULOS, D.A., MUNDA, G., VREEKER, R., 2006, "Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning". *Energy Sources, Part B - Economics Planning and Policy*, pp. 181-193.
- RAUPP, I.P., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., CHAN, P.D.S., 2015, "Propostas de Aperfeiçoamento na Seleção de Alternativas de Divisão de Quedas em Estudos de Inventário e a Explicitação de suas Consequências", In: *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Brasília-DF.
- ROY, B., 1999, "Decision aiding today: what should we expect?". In: *Multicriteria decision making-advances in MCDM models, algorithms, theory and applications*, Chap. 1 Kluwer, Dordrecht, pp. 1-35.
- ROY, B., 1991, "The outranking approach and the foundations of electre methods". *Theory and Decision*, v. 31, p. 49-73.
- ROY, B., HUGONNARD J., 1982, "Ranking of Suburban Line Extension Projects for The Paris Metro System by a Multicriteria Method", *Transportation Research*, vol. 16 A, pp. 301-312.
- ROY, B., SLOWINSKI, R., 2013, "Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method". *EURO Journal on Decision Processes*, vol. 1, issue 1-2, pp 69-97.
- SAATY, T.L., 1991, "Método de Análise Hierárquica". São Paulo: McGraw-Hill, Makron.
- SIMBERLOFF, D., FARR, J.A., COX, J., MEHLMAN, D.W., 1992, "Movement Corridors: Conservation Bargains or Poor Investments", *Conservation biology*, vol. 6, nº 4.
- TAHA, R.A., DAIM, T., 2013, "Multi-criteria applications in renewable energy analysis, a literature review". *Research and Technology Management in the Electricity Industry, Green Energy and Technology*, Springer-Verlag Londres.
- THEMAG ENGENHARIA LTDA, 1987, "Bacia do Medio Tocantins. Estudos Finais de Inventário – Apêndice H. Relatório Final".

THEODOROU, S., FLORIDES, G., TASSOU, S., 2010, "The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review". *Energy Policy*, vol. 38, pp. 7783-7792, Elsevier.

TRINKENREICH, J., WANDERLEY, V.M., ALBUQUERQUE, J.C., PINHEIRO, S.F., 1980, "Modelo de Análise da Expansão a Longo Prazo do Sistema Interligado Brasileiro", Subcomitê de Planejamento de Sistemas Elétricos, Comitê Brasil, CIER.

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

VILAS BOAS, C.L., 2005, "Análise da Aplicação de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD) na Gestão de Recursos Hídricos", Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/go/Analise%20da%20Aplicacao%20de%20Metodos%20Multicriterios%20de%20Apoio%20a%20Decisao%20na%20Gestao%20de%20Recursos%20Hidricos.pdf>>. Acesso em: Dezembro/2016

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

ANEXO 1: QUESTIONÁRIO PRELIMINAR

PERGUNTA 01:

Se a escolha da melhor alternativa dos Estudos de Inventário considerasse 3 critérios, conforme a equação abaixo:

$$I = (P1 \times ICB) + (P2 \times IAN) + [P3 \times (1-IAP)]$$

Onde:

- ICB : Índice Custo-benefício = custo (implantação + operação) para a alternativa gerar sua energia firme
- IAN : Impacto socioambiental negativo da alternativa dentro da bacia
- IAP : Impacto socioambiental positivo da alternativa considerando aspectos referentes ao desenvolvimento regional (aumento mercado de trabalho, uso racional dos recursos hídricos, aumento da arrecadação municipal, melhoria da infraestrutura rodoviária)

Quais valores de peso você escolheria para a escolha da melhor alternativa, de modo que os pesos representem a importância relativa de cada critério frente aos demais?

Os pesos devem somar 1

Figura 41: Pergunta 1 do questionário preliminar.

PERGUNTA 02:

Considerando que o Estudo de Inventário que você está analisando possui as alternativas listadas na tabela ao lado.

Com os pesos definidos na PERGUNTA 01, a alternativa vencedora seria:

Analizando as alternativas, você concorda com a alternativa selecionada?

SIM NÃO

Se você selecionou NÃO, qual alternativa você escolheria como a melhor?

Figura 42: Pergunta 2 do questionário preliminar.

ALTERNATIVAS		ICB	IAN	(1-IAP)	I
1	9B	0,57	0,66	0,66	0,000
2	7B	0,54	0,67	0,70	0,000
3	3R	0,61	0,61	0,77	0,000
4	17RR	0,65	0,65	0,79	0,000
5	17R	0,69	0,62	0,82	0,000

MELHOR				PIOR
--------	--	--	--	------

Figura 43: Continuação da Pergunta 2 do questionário preliminar, para identificação automática da alternativa vencedora segundo os pesos informados na Pergunta 1.

PERGUNTA 03:

Considerando o mesmo caso anterior, porém alterando um pouco os índices:

- 1) IAN*: impacto socioambiental negativo dentro e fora da bacia
- 2) IAP*: Impacto socioambiental positivo considerando o desenvolvimento regional e o vetor de conservação permanente

$$I = (P1 \times ICB) + (P2 \times IAN^*) + [P3 \times (1-IAP^*)]$$

Quais valores de peso você escolheria, de modo a representar a importância relativa de cada critério frente aos demais?

P1

P2

P3

Os pesos devem somar 1

Figura 44: Pergunta 3 do questionário preliminar.

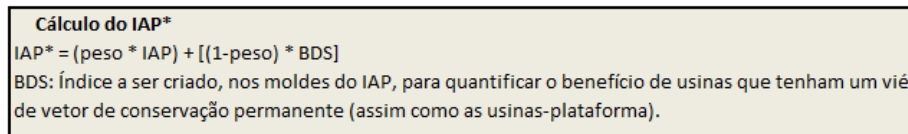
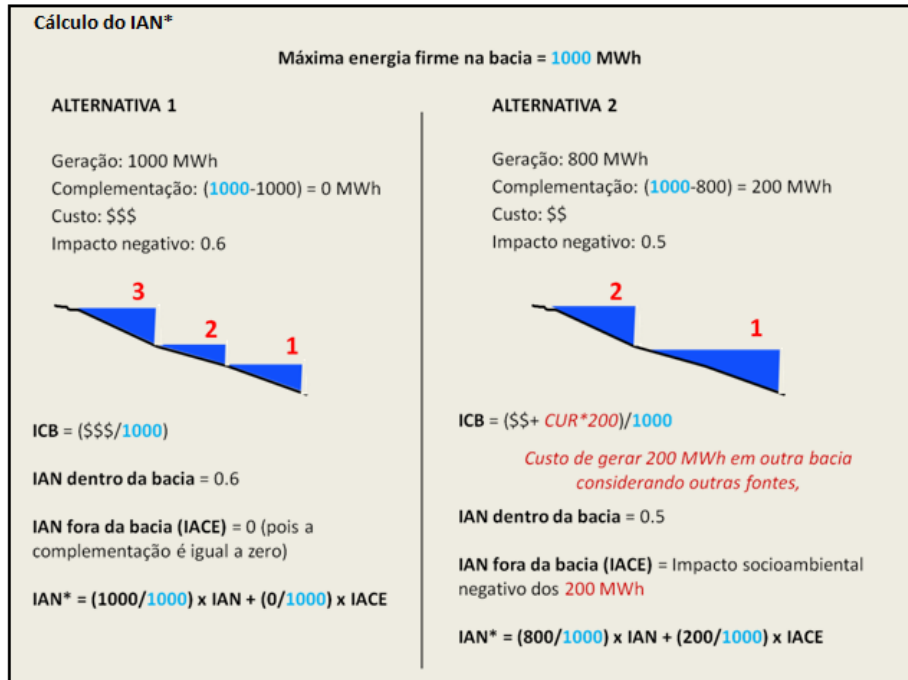


Figura 45: Continuação da Pergunta 3 do questionário preliminar, com o objetivo de explicar os critérios IAN* e IAP*.

PERGUNTA 04:

Considerando a Análise Multiobjetivo contendo 5 critérios separados:

$$I = (P1 \times ICB) + (P2 \times IAN) + [P3 \times (1-IAP)] + (P4 \times IACE) + [P5 \times (1-BDS)]$$

Onde:

- ICB : Índice Custo-benefício = custo (implantação + operação) para a alternativa
- IAN : Impacto socioambiental negativo da alternativa dentro da bacia
- IAP : Impacto socioambiental positivo da alternativa (desenvolvimento regional)
- IACE : Impacto socioambiental negativo fora da bacia
- BDS : Impacto socioambiental positivo (vetor de conservação permanente)

Quais valores de peso você escolheria, de modo a representar a importância relativa de cada critério frente aos demais?

P1 P2 P3 P4 P5

Os pesos devem somar 1

Figura 46: Pergunta 4 do questionário preliminar.

PERGUNTA 05:

Você sentiu mais dificuldade em responder qual pergunta?

Pergunta 3 Pergunta 4

Por que?

MUITO OBRIGADO PELA PARTICIPAÇÃO!

Figura 47: Última pergunta do questionário preliminar.