

**EVERTHON TAGHORI SICA**

**PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM SISTEMA DE  
APOIO À DECISÃO VIA MULTICRITÉRIO E DINÂMICA DE  
SISTEMAS**

**FLORIANÓPOLIS – SC**

**2009**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM SISTEMA DE  
APOIO À DECISÃO VIA MULTICRITÉRIO E DINÂMICA DE  
SISTEMAS**

Tese de doutorado submetida à Universidade Federal  
de Santa Catarina como parte dos requisitos para  
obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. C. Celso de Brasil Camargo, D. Eng.

**EVERTHON TAGHORI SICA**

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2009



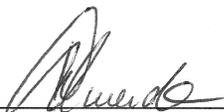
**PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM SISTEMA DE APOIO À  
DECISÃO VIA MULTICRITÉRIO E DINÂMICA DE SISTEMAS**

EVERTHON TAGHORI SICA

"Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina."

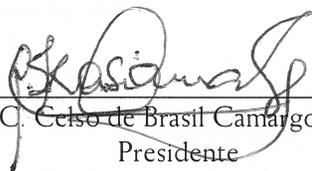


Prof. C. Celso de Brasil Camargo, D. Eng.  
Orientador

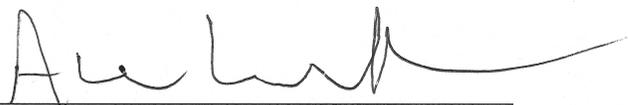


Prof. Katia Campos de Almeida, Ph.D.  
Coordenadora do Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



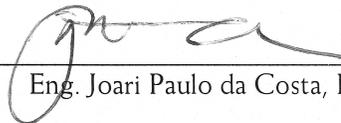
Prof. C. Celso de Brasil Camargo, D. Eng.  
Presidente



Eng. Antonio Eduardo Leão Lanna, Ph.D.



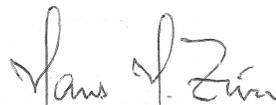
Eng. João José Cascaes Dias, D.Sc



Eng. Joari Paulo da Costa, D.Sc.



Prof. Raimundo C. Ghizoni Teive, D. Eng.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

*O Ribeirão da Infância*

*Não o reencontro.  
Nem reencontrarei  
o ribeirão da minha infância.  
Sua morte foi decreto público  
de morte inteira.  
De evitar qualquer vestígio.  
Não teve prestígio.  
Não tinha bandeira.*

*Nunca o fotografei.  
Mas guardei-o em mim.  
Nunca foi cartão postal.  
Mas é passaporte de saudade.*

*O ribeirão dorme  
sob entulho,  
num embrulho  
de crueldade.  
Dorme sob a assinatura  
do decreto.  
No esquecimento geral dorme  
e dorme na minha inútil lembrança.*

*Lindolf Bell*      \* 02 de novembro de 1938, em Timbó/SC  
† 10 de dezembro de 1998, em Blumenau/SC

*Código das Águas. Florianópolis: Editora Gloal, 1984, p. 32*

Aos meus pais Cesar e Mirtes que em todo amanhecer são lembrados das vezes que não dormiram, do orgulho que engoliram, do choro escondido, das alegrias, das festas e dos dias que jamais deixaram de pensar e lutar por seus filhos Everthon, Yuri e Rui.

Aos meus irmãos Yuri e Rui pelo carinho, pelas conversas, por existirem e pela certeza de que terei sempre vocês em minha vida.

À Mayra Silveira que suportou minhas ausências, que neste longo período esteve só mesmo ao meu lado, que compartilhou a solidão, mas com amor dedicou-se a alegrar os meus dias e jamais hesitou em me acompanhar.

A compaixão em relação aos animais é tão intimamente ligada à bondade que se pode em verdade dizer que ninguém é verdadeiramente bom se for cruel com os animais. A compaixão em relação aos animais vem da mesma fonte que a compaixão em relação às pessoas.

*Arthur Schopenhauer*

Não poderia deixar de agradecer os que estiveram ao meu lado enquanto todos dormiam, acompanharam a minha caminhada na graduação, no mestrado ou no doutorado e não hesitam (*hesitaram*) em retribuir o carinho e a companhia à distancia

à Rani, cocker spaniel inglês (*in memoriam*), que todas noites mesmo no inverno curitibano me recepcionava;

à Pitu, canino s.r.d. (*in memoriam*), pela eterna alegria e apego a sua bolinha;

à Nagi, kuvasz (pastor húngaro), que nos protege incondicionalmente e, mesmo distante a mais de 7 anos, ainda me recepciona como um filhote; e

ao lado

ao Nietzsche Almôndegas I, himalaio (*red point*), que, diante de sua altivez felina, acompanhou todos os meus passos durante as madrugadas sempre ao lado enquanto escrevia esta tese;

à Ana Cristina Skol, felino s.r.d., que sempre esteve disposta a perseguir qualquer inseto alado que me atrapalhasse enquanto escrevia esta tese.

Afinal cães e gatos precisam de carinho e o retribuem.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio técnico e estrutural.

Ao CNPq pelo apoio financeiro, durante o período de bolsista.

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) por meio dos engenheiros Adriano de Souza, Paulo Katsuaki Umezawa e, em especial, ao sr. Angelo Luiz de Franceschi, Gerente Executivo do Núcleo Sul, por ceder e autorizar o uso das séries de vazões naturais afluentes reconstituídas pelo ONS.

Ao Dr. Celso de Brasil Camargo pela confiança e amizade dispensadas ao longo de nossa convivência e parceria, mas, sobretudo pela orientação no mestrado e no doutorado.

Ao Dr. Hans Helmut Zürn, notável professor e pesquisador, pela amizade e enriquecedoras conversas que sempre acrescentaram cultura e conhecimento e pela participação na banca examinadora e contribuições ao trabalho.

Ao Dr. Raimundo C. Ghizoni Teive, notável professor e pesquisador, pela amizade e contribuições decisivas em Dinâmica de Sistemas, sem as quais este trabalho teria rumo diferente, e pela participação na banca examinadora e contribuições ao trabalho.

Ao Dr. Antonio Eduardo Leão Lanna, pesquisador de notória excelência na área de recursos hídricos, pela participação na banca examinadora e contribuições ao trabalho, seus livros, artigos e demais publicações foram fonte de pesquisa e de referência na condução deste trabalho.

Ao Dr. João José Cascaes Dias, engenheiro de grande experiência, pela participação na banca examinadora, contribuições ao trabalho e argumentação durante a defesa que refletiram a experiência obtida ao longo dos anos de dedicação ao setor de energia elétrica.

Ao Dr. Joari Paulo da Costa, pesquisador de notória excelência para o setor de energia elétrica, pela leitura extremamente cuidadosa do documento, apresentando contribuições de grande relevância nas diversas áreas de conhecimento que compõem o trabalho, especialmente, no modelo desenvolvido e pela participação na banca examinadora.

Aos professores do LabPlan Edson Luiz da Silva, Ildemar Cassana Decker, Jorge Coelho, pela amizade e conhecimentos compartilhados durante todo o período de convivência e estudo.

Aos amigos de LabPlan Adriano de Souza, Erlon C. Finardi, Fabiano F. Andrade, Raphael E. C. Gonçalves, Ritchie Guder, Marina Ubeda Souto, e ao companheirismo de Mauricio Sperandio, Gustavo Antônio Baur Arfux, Marcelo Luís L. dos Santos, Marcelo N. Agostini. Em especial a Edison A. C. Aranha Neto e a Gelson A. A. Brigatto pelas conversas enriquecedoras que contribuíram com a implementação do método multicritério; a Fabrício Y. K. Takigawa e a Rafael N. Rodrigues, também colegas de trabalho no IFSC, pelas conversas enriquecedoras que contribuíram com a implementação da otimização multiobjetivo; a Alexandre N. Zucarato pelas variadas discussões políticas; a Vitor Luiz de Matos pela disposição e conhecimento compartilhado na área de planejamento hidrotérmico; a Alexandre Fürstenberger e Vanessa V. de Araújo pelo carinho e amizade; a Daniel Dotta e Rubiara C. Fernandes pela amizade, companheirismo durante o mestrado e agora como professores do IFSC.

Ao amigo e irmão João Marcelo B. Machado, que me acompanha há mais de quinze anos, pelos momentos compartilhados, por fazer parte da família, e à Emirena.

Aos amigos Sergio Betave e Raela Rolim pelo sempre e disposto sorriso, pela alegria, amizade e festas proporcionadas.

Resumo da Tese apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO VIA MULTICRITÉRIO E DINÂMICA DE SISTEMAS**

**Everthon Taghori Sica**

Março/2009

Orientador: C. Celso Brasil Camargo, D. Eng.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: planejamento integrado, geração de energia, usos múltiplos, multicritério, dinâmica de sistemas, apoio à decisão.

Número de Páginas: 163

A evolução das atividades produtivas, a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos, a dependência de energia da atual sociedade e o mote do desenvolvimento sustentável norteiam e acarretam novas direções para o planejamento do setor de energia elétrica. Nesse sentido, este trabalho desenvolve um sistema de suporte à decisão ao planejamento integrado entre os setores de recursos hídricos e de energia elétrica, condicionado pelos usos múltiplos das águas, em uma bacia hidrográfica. Para tanto, implementa-se um modelo baseado na Dinâmica de Sistemas e na metodologia multicritério de apoio à decisão. O modelo desenvolvido envolve os pontos de vista dos diversos atores sociais e auxilia nas soluções de comprometimento no caso de a demanda hídrica ser superior à oferta, considerando as restrições operativas, variáveis hidrológicas, econômicas, sociais e ambientais, segundo as atuais diretrizes do sistema de gestão das águas. O modelo foi aplicado a um sistema delimitado por uma bacia hidrográfica com quatro usinas hidrelétricas em cascata, estabelecendo cenários que permitem a análise da evolução da disponibilidade hídrica para produção de energia elétrica e dos usos múltiplos, além das implicações dos *trade-offs* auferidos a cada segmento econômico usuário das águas diante do Ótimo de Pareto.

Abstract of Thesis presented to Federal University of Santa Catarina as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electric Engineering.

**INTEGRATED PLANNING OF WATER RESOURCE FOR ELECTRIC POWER  
GENERATION: A DECISION SUPPORT SYSTEM BY MULTICRITERIA AND SYSTEM  
DYNAMICS**

**Everthon Taghori Sica**

March/2009

Advisor: C. Celso Brasil Camargo, D. Eng.

Area of Concentration: Systems of Electric Power

Keywords: integrated planning, electric generation, multiple uses, multicriteria, systems dynamics, support to decision.

Number of Pages: 163

The evolution of productive activities, the participation and decentralized management of water resources, the energy dependence of current society and the motto of sustained development guide and bring about new directions for the electric power planning. This work proposes the development of a integrated planning decision support system between the water resources and electric power sections, conditioned by the water multiple uses, in a hydrographic basin. The proposal aims at developing a model using systems dynamics and multicriteria decision making methodology. The purpose is to involve stakeholders' points of view and to look for compromising solutions, besides considering hydrologic, economic, social and environmental aspects according to current guidelines of the water management system. The model allows analysis of scenario evolutions of the water availability for electric power production and evaluate the implications of user trade-offs for user in the face of Pareto Optimality.

# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b>	<b>X</b>
----------------	----------

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XIII</b>
-------------------------	-------------

<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XV</b>
-------------------------	-----------

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
-------------------	----------

1	<i>Problemática</i>	2
1.1	<i>Situação problema</i>	3
1.1.1	<i>Questões norteadoras</i>	6
1.1.2	<i>Enfoque</i>	8
1.1.3	<i>Principal contribuição</i>	9
1.1.4	<i>Hipóteses de trabalho</i>	10
1.2	<i>Objetivos</i>	10
1.2.1	<i>Geral</i>	10
1.2.2	<i>Específicos</i>	11
1.2.3	<i>Resultado esperado</i>	12
1.3	<i>Justificativa</i>	12
1.4	<i>Metodologia</i>	13
1.5	<i>Estrutura do trabalho</i>	15

<b>PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS</b>	<b>17</b>
---	-----------

2	<i>Mutualidade entre os setores de recursos hídricos e de energia elétrica</i>	18
2.1	<i>Planejamento integrado de recursos</i>	19
2.2	<i>Gestão descentralizada dos recursos hídricos</i>	20
2.3	<i>Arcabouço jurídico e institucional</i>	22
2.3.1	<i>Aspectos jurídicos relevantes</i>	25
2.3.1.1	<i>Princípios legais que regem a gestão e o planejamento</i>	25
2.3.1.2	<i>Instrumentos básicos</i>	26
2.3.2	<i>Comitês de bacia hidrográfica</i>	27
2.3.3	<i>Usos múltiplos e prioritários das águas</i>	28
2.4	<i>Conclusões</i>	31

<b>ABORDAGENS METODOLÓGICAS</b>	<b>33</b>
---------------------------------	-----------

3	<i>Multicritério e Dinâmica de Sistemas</i>	34
3.1	<i>Multicritério</i>	34
3.1.1	<i>Trade-offs e taxa marginal de substituição</i>	34
3.1.2	<i>Métodos de otimização multiobjetivo</i>	36
3.1.3	<i>Método de não-preferência</i>	37
3.1.3.1	<i>Método do critério global</i>	37
3.1.4	<i>Método a posteriori</i>	38
3.1.4.1	<i>Método de pesos</i>	38
3.1.4.2	<i>Método de pesos como método a priori</i>	39

3.1.4.3	<i>Método de <math>\varepsilon</math>-restrições</i>	39
3.1.4.4	<i>Método híbrido</i>	41
3.1.4.5	<i>Método p-norma</i>	41
3.1.4.6	<i>Algoritmos genéticos</i>	42
3.1.5	<i>Métodos a priori</i>	43
3.1.5.1	<i>Método da função valor/ utilidade</i>	43
3.1.5.2	<i>Método do ordenamento lexicográfico</i>	45
3.1.5.3	<i>Método da programação por metas</i>	46
3.1.5.4	<i>Método de alcançar a meta</i>	47
3.1.6	<i>Métodos iterativos</i>	48
3.1.6.1	<i>Metodologia multicritério de apoio à decisão (MCD.A)</i>	51
3.1.6.2	<i>Método da pontuação direta</i>	57
3.1.6.3	<i>Método da Bissecção</i>	57
3.1.6.4	<i>Método MACBETH</i>	58
3.1.6.5	<i>Método AHP</i>	59
3.1.6.6	<i>Método Electre</i>	61
3.1.6.7	<i>Método Prometbee</i>	62
3.1.6.8	<i>Método da função utilidade multidimensional</i>	63
3.1.7	<i>Aplicações</i>	64
3.2	<i>Dinâmica de sistemas</i>	68
3.2.1	<i>Modelagem de sistemas complexos</i>	73
3.2.1.1	<i>Equilíbrio do ciclo das águas</i>	75
3.2.1.2	<i>Disponibilidade hídrica e usos múltiplos</i>	77
3.2.2	<i>Aplicações</i>	79
3.3	<i>Conclusões</i>	82

## **MODELAGEM E SIMULAÇÃO 85**

4	<i>Modelo de produção de energia elétrica sob usos múltiplos</i>	86
4.1	<i>Modelagem do sistema hidroenergético de estudo</i>	87
4.1.1	<i>Submodelo de crescimento demográfico</i>	91
4.1.2	<i>Submodelo de demanda hídrica</i>	93
4.1.3	<i>Submodelo de trade-off</i>	96
4.1.4	<i>Submodelo de geração de energia elétrica</i>	102
4.2	<i>Simulação</i>	108
4.3	<i>Conclusões</i>	118

## **CONCLUSÕES 121**

5	<i>Considerações finais</i>	122
5.1	<i>Recomendações para trabalhos futuros</i>	127
5.2	<i>Artigos publicados</i>	128

## **APÊNDICE A 131**

A.1	<i>Gestão econômica dos recursos naturais</i>	132
A.1.1	<i>Valor econômico das águas</i>	133
A.1.1.1	<i>Paradoxo das externalidades</i>	134
A.1.1.2	<i>Uso de bens e serviços ambientais</i>	135
A.1.2	<i>Economia ecológica</i>	136
A.1.3	<i>Planejamento e Mercado</i>	138
A.1.3.1	<i>Gestão pela esfera privada ou pública</i>	141

<b>APÊNDICE B</b>	<b>145</b>
<i>B.1 Tabulação dos dados de entrada</i>	<i>146</i>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>153</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 As três esferas (Passet, 1979) .....	7
Figura 1.2 Esferas de conhecimento a serem incorporadas no planejamento.....	8
Figura 1.3 Abordagem para o planejamento integrado.....	13
Figura 2.1 Organograma simplificado do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Sica, Souza e Fernandes, 2005) .....	23
Figura 3.1 Ótimo de Pareto sob a curva de indiferença, adaptado de Miettinen (1999, p. 28).....	35
Figura 3.2 Caminho de busca para o método de alcançar a meta .....	47
Figura 3.3 Curvas de indiferenças elaboradas com os decisores, adaptada de Hobbs e Meier (2000, p. 59). .....	51
Figura 3.4 Análise de preferência, região de viabilidade dos critérios, adaptada de Hobbs e Meier (2000, p. 49) .....	52
Figura 3.5 Estrutura do modelo multicritério (Sica, 2003, p. 69).....	54
Figura 3.6 Ciclo de realimentação (feedback loops).....	69
Figura 3.7 Diagrama de laços causais .....	70
Figura 3.8 Simbologia de diagramas de fluxo (Forrester, 1968).....	71
Figura 3.9 Método de Euler .....	72
Figura 3.10 Modelo do conceito de ciclo hidrológico proposto por Leonardo da Vinci, por volta de 1500, adaptado de Christofoletti (1999, p. 100).....	74
Figura 3.11 Esquema representativo das variações observadas sobre os indicadores de temperatura, nos continentes e nos oceanos, adaptado de Christofoletti (1999, p. 133).....	76
Figura 3.12 Esquema representativo das variações observadas sobre os indicadores hidrológicos, nos continentes e nos oceanos, adaptado de Christofoletti (1999, p. 133).....	77
Figura 3.13 Diagrama do modelo WorldWater desenvolvido por Simonovic (2002, p. 256).....	82
Figura 4.1 Visualização parcial da bacia do Jacuí (Google Earth, 2008).....	88
Figura 4.2 Perfil longitudinal da bacia do Rio Jacuí, adaptado de ONS (2006, p. 12).....	89
Figura 4.3 Localização das usinas hidrelétricas e interligação por linhas de transmissão, ONS horizonte de 2010.....	90
Figura 4.4 Diagrama operativo hidráulico simulado da bacia do Rio Jacuí, adaptado de ONS (2006, p. 5).....	90
Figura 4.5 Visão geral do modelo em Dinâmica de Sistemas.....	91
Figura 4.6 Diagrama de laços causais dos modelos de (a) crescimento populacional e (b) residências, adaptado de Forrester (1969).....	92
Figura 4.7 Submodelo de crescimento demográfico - validação.....	92
Figura 4.8 Submodelo de crescimento populacional.....	93
Figura 4.9 Submodelo de residências .....	93
Figura 4.10 Interface do modelo de crescimento anual da demanda hídrica .....	94
Figura 4.11 Submodelo de demanda hídrica.....	95
Tabela 4.1 Referência de tabulação de outorga dos usos múltiplos.....	96
Figura 4.12 Submodelo de trade-off.....	97
Figura 4.13 Árvore de decisão dos trade-offs para usos múltiplos .....	98
Figura 4.14 - Interface de construção dos trade-offs .....	98
Figura 4.15 Diagrama de simulação.....	103
Figura 4.16 Interface para o carregamento da série histórica reconstituída de afluência natural .....	103
Figura 4.17 Submodelo de geração de energia elétrica.....	104

Figura 4.18 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Passo Real .....	104
Figura 4.19 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Jacuí .....	104
Figura 4.20 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Itaúba.....	105
Figura 4.21 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Dona Francisca.....	105
Figura 4.22 Modelo de energia produzida na bacia .....	105
Figura 4.23 Consumo para o abastecimento público no horizonte de simulação .....	108
Figura 4.24 Energia produzida na bacia hidrográfica segundo volumes de aversão de 10% a 70% .....	109
Figura 4.25 Volume total do reservatório de Passo Real segundo volumes de aversão de 10% a 70% .....	110
Figura 4.26 Energia média produzida na bacia pela média do volume percentual do reservatório segundo o volume de aversão.....	111
Figura 4.27 Reservatório da UHE Passo Real sob volume de aversão em 40% .....	112
Figura 4.28 Energia produzida na bacia sob volume de aversão em 40%.....	112
Figura 4.29 Energia produzida em cada usina hidrelétrica sob volume de aversão em 40%, série 1950-4.....	113
Figura 4.30 Energia produzida em cada usina hidrelétrica sob volume de aversão em 40%, série 1980-4.....	113
Figura 4.31 Comportamento da operação das usinas para série 1950-4 atendendo à demanda hídrica.....	114
Figura 4.32 Comportamento da operação das usinas para série 1950-4 não atendendo à demanda hídrica .....	114
Figura 4.33 Comportamento da operação das usinas para série 1980-4 atendendo à demanda hídrica.....	115
Figura 4.34 Comportamento da operação das usinas para série 1980-4 não atendendo à demanda hídrica .....	115
Figura 4.35 Vazão defluente da usina hidrelétrica D. Francisca sob volume de aversão em 40%.....	116
Figura 4.36 Comportamento das outorgas requeridas na série 1950-4 sob volume de aversão em 40%.....	117
Figura 4.37 Comportamento das outorgas requeridas na série 1980-4 sob volume de aversão em 40%.....	117
Figura 5.1 Processo de estabelecimento dos trade-offs.....	123
Figura A.1 Fluxo energético entre a economia e o meio ambiente, adaptado de Pillet (1993, p. 272).....	134
Figura A.2 Interdependência entre a economia, sociedade e meio ambiente, adaptado de Passet (1979).....	135
Figura A.3 Esquema circular das relações economia-meio ambiente (Sica e Camargo, 2004a).....	136
Figura A.4 Diminuição da quantidade energética disponível e aumento da taxa de qualidade energética (Merico, 1996) .....	138
Figura A.5 Modelo energético resumido da água na bacia hidrográfica de uma lagoa (Odum, 2000).....	138
Figura A.6 Modelo simplificado de fluxo de energia/matéria-prima entre economia e meio ambiente, baseado na metodologia desenvolvida por Howard T. Odum (1983).....	141

# LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 Escala comparativa de julgamento semântico para o método MACBETH</i> .....	58
<i>Tabela 3.2 Escala comparativa de julgamento semântico para o método AHP</i> .....	60
<i>Tabela 4.1 Referência de tabulação de outorga dos usos múltiplos</i> .....	96
<i>Tabela 4.2 Comparação entre os volumes proporcionais de outorga, em determinado estágio de simulação</i> .....	102
<i>Tabela 4.3 Coeficientes para os polinômios de cota jusante e montante (ONS,2007b)</i> .....	107
<i>Tabela 4.4 Características técnicas das usinas hidrelétricas (ONS, 2007b)</i> .....	108
<i>Tabela 5.1 Vazões incrementais – afluência histórica de 1950 a 1954</i> .....	146
<i>Tabela 5.2 Vazões incrementais – afluência histórica de 1980 a 1984</i> .....	147
<i>Tabela 5.3 Outorgas entre as UHEs de Passo Real e de Jacuí</i> .....	148
<i>Tabela 5.4 Outorgas entre as UHEs de Jacuí e de Itaúba</i> .....	149
<i>Tabela 5.5 Outorgas entre as UHEs de Itaúba e de D. Francisca</i> .....	150
<i>Tabela 5.6 Outorgas a jusante da UHE D. Francisca</i> .....	151

## **CAPÍTULO**

# **1**

## **INTRODUÇÃO**

A estrutura deste capítulo obedece à formalidade organizacional exigida pela metodologia científica hipotético-dedutiva. Assim, inicialmente, é definida a problemática - que trata do conjunto de problemas abrangentes e relativos ao estudo. A partir desse conjunto, delimita-se a situação problema, restringindo-se a problemática com foco no objeto. Com base na situação problema obtêm-se as questões que norteiam o objeto de estudo, as hipóteses de trabalho e as principais contribuições da tese. O enfoque é o modo ou a perspectiva como se distingue e se percebe o problema, que neste trabalho é o sistêmico.



# 1 Problemática

A ascensão e a queda de civilizações estão intimamente ligadas ao uso e ao abuso dos recursos hídricos. Em tempos remotos, a derrocada da agricultura levou civilizações a desaparecerem, tais como os maias, no Yucatán e os sumérios, que ocupavam a baixa Mesopotâmia dos rios Tigre e Eufrates, em razão da salinização dos solos<sup>1</sup>.

De certa forma, as primeiras tentativas do homem de alterar o meio ambiente foram em decorrência da absoluta necessidade por água potável e de sua variabilidade temporal e espacial. Assim, almejando aumentar a oferta de água, muitos países construíram barragens<sup>2</sup> e desviaram rios.

Em escala local, a ocupação do espaço geográfico e o conseqüente desenvolvimento econômico podem ocorrer, principalmente, em função da disponibilidade de água, de modo que, muitas vezes “determina a localização de certas indústrias, como a de geração de energia [...] e o estabelecimento de povoações” (Drew, 2002, p. 87).

A água, portanto, é um elemento fundamental e representa um insumo indispensável aos modos de produção de bens energéticos e não-energéticos. Desse modo, a água e a energia elétrica, mais do que fatores de produção, são elementos necessários à vida humana e ao exercício da cidadania.

Dentre os patrimônios naturais do País que ostenta a mais rica biodiversidade, a maior reserva hídrica de água doce do planeta e um imenso potencial energético, a água não poderia deixar de se destacar economicamente. Pela ótica da exploração econômica de curto prazo, na qual o consenso é o mercantilismo dos bens comuns, a maximização dos benefícios se resume, apenas, em obter a taxa ótima de extração.



<sup>1</sup> Em 14 de março de 2003, a Revista *Science* publicou um trabalho que pôs fim ao enigma do desaparecimento da civilização maia, entre 800 e 900 d.C.: a falta de água e a seca intensa prejudicaram de forma decisiva a agricultura da época. (Bouguerra, 2004, p. 31).

<sup>2</sup> As primeiras construções de reservatórios datam de 8.000 anos entre os Rios Tigre e Eufrates (antiga Mesopotâmia), já as primeiras construções registradas datam de 3.000 a.C. (Tundisi, 2003, p. 43). Por volta de 250 a.C., na China, Li Bing construía a primeira barragem no Rio Minjiang, afluente do Yangtze. O reservatório construído permitia a irrigação por meio de canais, quando abertos, e controlavam as cheias, quando fechados. Li Bing colocou três estátuas de homens, que serviam de escala de referência no rio. Quando os pés das estátuas estavam visíveis a seca estava próxima e quando ambos estivessem encobertos a cheia estava próxima (Bouguerra, 2004, p. 20).

Nesse sentido, o economista Kenneth Boulding, em 1966, discerniu duas formas de exploração dos recursos naturais: à *cowboy* e à astronauta. A primeira forma “explora os recursos sem se preocupar com as conseqüências e se desloca para um novo território, quando os recursos do velho território estiverem esgotados”. A segunda “reconhece que, assim como uma nave espacial, a Terra não goza de recursos ou de jazidas ilimitadas” (Prestre, 2000, p. 45). Uma das principais diferenças entre as duas formas de exploração reside em esgotar (a primeira) ou não (a segunda) a capacidade do meio ambiente em assimilar os resíduos gerados pela atividade econômica.

Portanto, ao analisar um problema que envolva recursos naturais renováveis – como a água, por exemplo – é recomendável considerar a variabilidade tempo-espaço, as interferências antrópicas e seus múltiplos usos. Trata-se, então, de um problema multidisciplinar e, sobretudo, interdisciplinar.

## 1.1 Situação problema

A intensificação e a diversificação do uso das águas implicam aumento da retirada de água<sup>3</sup>. Quando a retirada de água excede “a quantidade reposta pela precipitação e recarga, há um desequilíbrio que causa escassez” (Tundisi, 2003, p. 31).

Dos volumes de água estocados na Terra, cerca de 97,5% estão nos oceanos e mares; apenas 2,5% é água doce. Por sua vez, dos estoques de água doce, 68,9% estão nas calotas polares e geleiras; 29,9% sob a forma de águas subterrâneas; 0,9%, nos pântanos; e apenas 0,3% em rios e lagoas (Rebouças, 2002, p. 07).

Segundo as Nações Unidas (*United Nations*, 2002), o uso dos recursos hídricos aumentou duas vezes mais que a taxa de crescimento populacional, no último século, e aproximadamente 50% de todas as áreas cobertas com água doce foram perdidas.

Atualmente, segundo Tundisi (2003, p. 64-6), 1,3 bilhões de pessoas não têm acesso à água potável e existe uma degradação contínua da diversidade dos ecossistemas e das funções



<sup>3</sup> Em razão da excessiva retirada de água, nos Estados Unidos, o Rio Colorado teve a salinidade aumentada e o aquífero Ogallala perdeu cerca de 50% do volume de água em decorrência da irrigação intensiva, segundo Speidel *et al* (1988).



hidrológicas. O crescimento populacional, a rápida urbanização e o planejamento não integrado dos recursos disponíveis face às atividades econômicas são algumas causas destas situações. A projeção desse cenário indica que em

*2025, dois terços da população humana estará vivendo em regiões com estresse de água. Em muitos países em desenvolvimento a pouca disponibilidade de água afetará o crescimento e a economia local e regional (Tundisi, 2003, p. 65).*

O caso do lago de Aral<sup>4</sup> ilustra tragicamente os efeitos do planejamento quando há ausência de conciliação entre o crescimento econômico e a dinâmica do ecossistema a fim de assegurar a reprodutibilidade do recurso natural renovável.

Dentre as possíveis alternativas para modificar esse quadro, o planejamento integrado adaptativo, atento aos usos múltiplos, é uma solução possível. Todavia, no Brasil, a grande variabilidade espacial e temporal dos recursos hídricos torna essa tarefa complexa.

O Brasil possui cerca de 13,7% das reservas de água doce do planeta. A Amazônia concentra aproximadamente 70% da água do País e abriga por volta de 4,5% da população brasileira. Já, a região hidrográfica da Bacia do Paraná, com aproximadamente 32% da população, possui, apenas, cerca de 6,5% da água doce do País, segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos, PNRH (2003, p. 51-7).

Na região Norte, apesar da abundância de recursos hídricos, o potencial hidrelétrico explorado é relativamente pequeno e as condições sanitárias são precárias, causando problemas à saúde humana, especialmente a mortalidade infantil.

No Sul e no Sudeste, o crescimento populacional, a urbanização, a intensificação das atividades agrícolas e a diversificação dos usos múltiplos aumentam os custos para a água bruta e tratada. Isso “representa um empecilho ao crescimento econômico e ao desenvolvimento”, segundo Tundisi (2003, p. 94).



---

<sup>4</sup> Entre 1940 e 1980 a antiga URSS foi o segundo maior produtor de algodão do planeta. A bacia hidrográfica do Mar de Aral é compartilhada pelo Afeganistão, Irã e mais cinco países da antiga URSS. Esse lago suportava uma indústria de pesca, recreação e turismo. Entretanto, o projeto de expandir a produção de algodão para exportação, irrigando as planícies centrais da Ásia e os desertos de Uzbek e Kazakh, desviando os Rios Amu e Syr, afluentes do Mar de Aral, reduziu drasticamente o volume. Em 1960, a profundidade do mar de Aral era de 53,4 metros, com área de 66.900 km<sup>2</sup> e volume de 1.050 km<sup>3</sup>. Esta área foi reduzida para 31.938 km<sup>2</sup> em 1994 e para 25.217 km<sup>2</sup> em 2000. Isto acarretou aumento de salinidade que passou de 10 g/L em 1960 para 60 g/L em 2000. Esse novo deserto expande-se a uma taxa de 150.000 hectares/ano (Tundisi, 2003, p. 46-7). O crescimento econômico desordenado da região, o uso de pesticidas e uma política governamental com objetivo de explorar ao máximo, em curto prazo, foram algumas das principais causas dessa tragédia.

Na região Centro-Oeste, o Pantanal mato-grossense está ameaçado em razão da exploração econômica desenfreada que afeta os recursos hídricos (desmatamento, criação intensiva de gado, monoculturas, como a soja, entre outros).

No Nordeste semi-árido, o principal problema é a escassez relativa, ou seja não é a pouca precipitação (entre 300 a 800  $\text{mm}/\text{ano}$ ) e sim a evaporação intensa (entre 1.000  $\text{mm}/\text{ano}$  e mais de 3.000  $\text{mm}/\text{ano}$ ) que prejudica as condições de recarga de aquíferos na área. Ademais, a diluição de esgotos domésticos não tratados e a ausência da coleta de maior parte do lixo contribuem para agravar as condições já existentes (Rebouças, 2004, p. 46).

Em termos pluviométricos, mais de 90% do território do Brasil têm chuvas entre 1.000  $\text{mm}/\text{ano}$  e mais de 3.000  $\text{mm}/\text{ano}$ . A disponibilidade das águas que escoam é de aproximadamente 33.841  $\text{m}^3/\text{ano}$  per capita. Em termos fluviométricos, a contribuição das águas subterrâneas às descargas de base<sup>5</sup> dos rios varia em torno de 11  $\text{mm}/\text{ano}$ , nas bacias hidrográficas esculpidas em rochas cristalinas do nordeste semi-árido; de 100 a 200  $\text{mm}/\text{ano}$  nos domínios sedimentares; e mais de 600  $\text{mm}/\text{ano}$  nas bacias do Amazonas e do Paraná (Rebouças, 2004, p. 39-40).

No entanto, apesar da abundância de água, a exploração econômica das reservas que abastecem as bacias hidrográficas brasileiras pode comprometer a qualidade e a quantidade das águas, acarretando maior incidência de doenças decorrentes do consumo de água tratada inadequadamente e de conflitos entre os vários segmentos econômicos pelo uso da água.

Em 8 de janeiro de 1997, pela Lei nº 9.433, inspirada no modelo francês, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos e criado o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH), a fim de organizar a área de recursos hídricos e consolidar os conceitos de gestão participativa e de visão sistêmica da água (Brasil, Lei nº 9.433). A articulação do planejamento dos recursos hídricos entre os demais setores usuários e a integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental são duas das diretrizes dispostas no Plano Nacional de Recursos Hídricos - PNRH (2003, p. 04).

<sup>5</sup> Valor das taxas de recarga das águas subterrâneas que ocorrem no subsolo da bacia hidrográfica (Rebouças, 2004, p. 40).



O modelo administrativo brasileiro de gerenciamento dos recursos hídricos por Comitês de Bacia e Agências de Água é inovador e sua implantação implica mudança de atitude e comportamento dos atores sociais<sup>6</sup> envolvidos que precisam dialogar e ser receptivos à parceria com demais usuários e comunidades. A efetiva operacionalização dos comitês depende fundamentalmente do processo político, gradual e progressivo consoante às especificidades locais e regionais.

Para o setor de energia elétrica, essa nova forma de gestão das águas implica mudanças significativas. A consideração dos demais usuários das águas na gestão dos recursos hídricos coloca em xeque a histórica hegemonia do setor. Embora exista um arcabouço regulatório mínimo, que prevê a articulação dos diversos organismos atuantes para garantir o uso múltiplo das águas, é preciso amadurecer as competências de cada um e intensificar a troca de informação, além de promover a conscientização da participação popular assegurada por lei.

O exercício da cidadania (participação plena e efetiva) e da consciência política da sociedade brasileira garantirá o espírito democrático do Plano Nacional de Recursos Hídricos, assegurando as condições necessárias para sua implementação.

### 1.1.1 Questões norteadoras

Para a maior parte dos recursos naturais que se caracterizam pelo uso múltiplo não é possível encontrar um substituto que possa preencher as funções econômicas, recreativas e biológicas; a água é um bom exemplo. Por isto, é necessário garantir a reprodutibilidade destes recursos naturais, conciliando o desenvolvimento econômico, social e o seu uso na direção do desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento sustentável pode ser considerado um conceito normativo tal como um “vetor de objetivos desejáveis, ou seja, uma lista de atributos, que a sociedade procura alcançar ou maximizar [...] a fim de responder as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazer as suas” (Faucheux e Noel,



---

<sup>6</sup> O ator social pode ser definido como um coletivo, porém não dissociado do sujeito, que sob uma determinada situação é capaz de transformá-la. Outrossim, o ator social - enquanto sujeito reflexivo sob um contexto social específico - possui informações e razões únicas para agir da forma que age. Trata-se de um conceito fundamental da sociologia de Max Weber em estudos sobre as relações entre a economia e a sociedade. Fato relevante para compreender as relações e a atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica.

1995, p. 285-6). Entretanto, ressalta-se que existem duas visões divergentes: a sustentabilidade fraca e a sustentabilidade forte. Assim,

*a primeira trata a sustentabilidade como uma nova forma de eficiência econômica estendida a gestão dos serviços da natureza. A segunda considera que a eficiência é um critério inadequado para satisfazer as preocupações do desenvolvimento sustentável e propõem regras de sustentabilidade que implicam no estado estacionário [...] como uma vontade de integrar as preocupações econômicas e ecológicas (Faucheux e Noel, 1995, p. 287).*

Tanto para a sustentabilidade fraca quanto para a forte, a economia é considerada como um sistema aberto<sup>7</sup> (Figura 1.1), ou seja, dependente dos bens e serviços provenientes do meio ambiente<sup>8</sup>. Assim, as relações dos recursos hídricos (como um recurso natural renovável capaz de fornecer bens e serviços ao sistema econômico através da gestão participativa e descentralizada) com a produção de energia elétrica e o desenvolvimento sustentável podem ser percebidas quando analisadas em suas relações mútuas e dinâmicas, ou seja, por uma visão sistêmica.

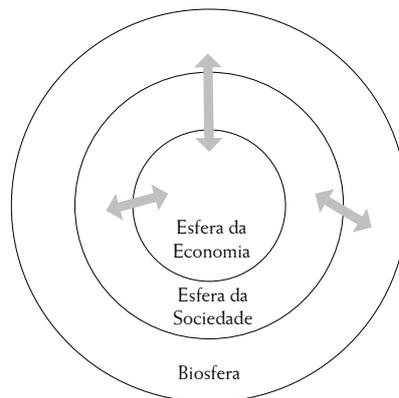


Figura 1.1 As três esferas (Passet, 1979)

Nesse sentido, ao propor um modelo para o planejamento integrado, pretende-se considerar a visão sistêmica e sinérgica dos processos intervenientes. Porém, deve, sobretudo, “promover um processo de longo prazo que conte com a participação de usuários, autoridades, cientistas e do público em geral” (Tundisi, 2003, p. 116).

### CS

<sup>7</sup> Sistemas fechados são aqueles em que existe troca de energia (entrada e saída), mas não de matéria, por exemplo: o ciclo hidrológico é um processo relacionado por meio da permuta de energia entre os estados sólido, líquido e gasoso, todavia o volume de água existente no globo terrestre permanece constante. Sistemas abertos são aqueles nos quais ocorrem constantes trocas de energia e matéria, por exemplo: a bacia hidrográfica (Christofoletti, 1999, p. 5-6).

<sup>8</sup> Segundo Daly (1991, p. 215) “a economia não está isenta das leis que governam os sistemas naturais”.

O paradigma de planejamento integrado de recursos hídricos para produção de energia elétrica consiste na mudança de um sistema setorial, local e de respostas a crises para um sistema integrado e aliado à dinâmica do capital natural<sup>9</sup>. Para tanto, deverão ser incorporadas ao planejamento da bacia hidrográfica, em conjunto com o setor de energia elétrica, as esferas social, econômica e ambiental (Figura 1.2).

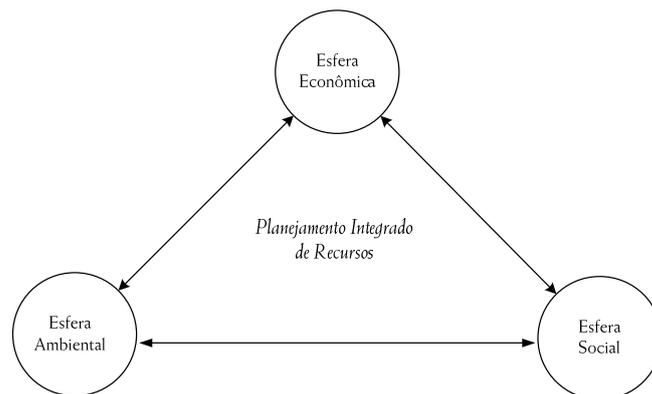


Figura 1.2 Esferas de conhecimento a serem incorporadas no planejamento integrado

## 1.1.2 Enfoque

Augusto Comte (1798-1857), por meio da sua Lei dos Três Estados, “hierarquizou as ciências, segundo um critério de generalidade decrescente e rigor crescente, separando em disciplinas científicas as que já atingiram e as que não atingiram a etapa positiva”<sup>10</sup> (Vasconcellos, 2002, p.63). Entretanto, as questões sobre o uso das águas necessitam de um pensamento que ligue as áreas de conhecimento que foram fragmentadas e



<sup>9</sup> O conceito de capital natural foi introduzido por Solow (1974) que juntamente com Stiglitz (1974) e com Dasgupta e Heal (1974) deduziram uma regra de sustentabilidade para modelos de crescimento ótimo com recursos naturais e, assim, ampliaram o conceito de desenvolvimento sustentável. Capital natural, então, pode ser definido como “o conjunto dos recursos naturais e dos serviços ambientais [...] que são assimilados na forma de capital como argumento de uma função utilidade ou como fator de produção. [...] Os princípios da teoria do capital podem ser aplicados ao capital natural” (Faucheux e Noel, 1995, p. 289-90).

<sup>10</sup> O termo positivista foi cunhado por Augusto Comte para definir o momento definitivo da razão humana por meio da Lei dos Três Estados. De acordo com esta lei cada ramo de nossos conhecimentos passa sucessivamente por três estados históricos: (i) no estado teológico ou fictício explica-se os fenômenos atribuindo-os a seres ou a forças superiores; (ii) no estado metafísico ou abstrato explica-se os fenômenos invocando entidades abstratas, como a natureza; e (iii) no estado científico ou positivo explica-se os fenômenos observando-os e fixando as relações, ou seja, renunciando a descoberta das causas e concentrando-se em estabelecer as leis que os governam. Os dois primeiros estados preparam gradualmente o conhecimento para o último e definitivo estado: o positivo (Aron, 1993, p. 73).

compartimentadas, uma vez que os problemas de gestão e de planejamento para os setores de energia elétrica e de recursos hídricos são multidisciplinares.

O pensamento analítico reducionista tem a premissa que o todo complexo pode ser entendido a partir das propriedades internas de suas partes. Todavia, ao negar ou deixar em plano secundário a relação entre as partes, além do seu contexto, pode-se produzir um conhecimento míope – incapaz de compreender a realidade do todo. O comportamento desta relação é caracterizado pela não-linearidade, pela realimentação e pelas inúmeras relações de troca. Portanto, é necessário reconhecer as relações dos vários agentes econômicos com os setores de energia elétrica e de recursos hídricos. Desse modo, as partes devem ser entendidas a partir da organização do todo, uma vez que as propriedades das partes não são independentes.

Nesse sentido, o tratamento das incertezas e da complexidade, por meio do enfoque sistêmico, faz parte de uma profunda mudança paradigmática a fim de superar o pensamento disjuntivo e redutor. Essa é uma característica chave presente nesta proposta de planejamento integrado, necessária à compreensão dos processos sobre o uso das águas para o desenvolvimento socioeconômico e a produção de energia elétrica.

### **1.1.3 Principal contribuição**

Este trabalho pretende elaborar cenários para análise do comportamento dos usos múltiplos da água, em particular para a geração de energia elétrica em uma bacia hidrográfica, e, deste modo, contribuir com a atividade de prognóstico através do planejamento integrado. Além disso, poderá auxiliar, como um dos estudos, na formulação de políticas públicas e econômicas para os setores de energia elétrica e de recursos hídricos. Todavia, não pretende esgotar o tema nem tão pouco se tornar suficiente para o entendimento das questões que norteiam os usos múltiplos das águas.

Para tanto, estruturou-se um modelo de planejamento integrado baseado na interação entre a metodologia multicritério de apoio à decisão, a otimização multiobjetivo e a dinâmica de sistemas, sendo esta interação, também, uma contribuição deste trabalho acadêmico.

### 1.1.4 Hipóteses de trabalho

A análise da dinâmica dos processos de tomada de decisão, por meio de modelagem e simulação, constitui um dos alicerces para a concepção de modos alternativos de regulação e de apropriação de recursos naturais renováveis.

O processo decisório sobre os usos múltiplos da água afeta, em diversos níveis, o planejamento, a operação e o próprio mercado de energia elétrica, além dos demais segmentos econômicos usuários das águas.

Os Comitês de Bacia Hidrográfica (CBH), conhecidos como parlamento da água, têm a função de aglutinar a ampla teia de significados<sup>11</sup> que cada decisor traz consigo para efetivar as questões relativas à gestão das águas. Desse modo, a diversidade de valores e experiências que cada sociedade tem com as águas pode ser representada pela metodologia multicritério de apoio à decisão, através dos *trade-offs* entre os usos múltiplos.

A bacia hidrográfica deve ser adotada como unidade de gestão e de planejamento. O processo de planejamento deve ser interativo, permitindo ao decisor explicitar os critérios a serem considerados e os riscos a serem assumidos, além de ser integrado com os processos econômicos, sociais e ambientais. Isso pode ser obtido ao conjugar o julgamento de valor dos decisores no CBH com a simulação por Dinâmica de Sistemas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Geral

A proposta do trabalho consiste em estruturar um sistema multicritério e desenvolver um modelo dinâmico adequado ao planejamento integrado entre os setores de energia



<sup>11</sup> Geertz (1989, p. 15) adota o conceito de cultura a partir das reflexões elaboradas por Max Weber, para quem o homem é um animal amarrado a teias de significados que ele mesmo teceu. Para Geertz, a cultura são essas teias e a sua análise. Neste sentido, o decisor pode ser representado pelo conjunto de valores e conceitos interligados entre si, e é partir desse conjunto que ele constrói o julgamento e a decisão sobre determinado fato ou processo, quando atuante nos comitês. Portanto, a gestão das águas fica subjugada à teia de significados e à formação social que cada decisor representa.

elétrica e de recursos hídricos, em consonância com as políticas públicas e econômicas para o uso do recurso natural renovável, que é a água.

Para tanto, é elaborado um modelo de suporte à decisão do planejamento integrado por meio de técnicas multicritério e da Dinâmica de Sistemas. Este modelo visa analisar o comportamento dinâmico da geração de energia elétrica em uma bacia hidrográfica sob diferentes cenários de afluências hidrológicas, considerando as perspectivas de desenvolvimento sustentável, de usos múltiplos e dos processos socioeconômicos, além das diretrizes jurídicas e institucionais que condicionam o uso dos recursos hídricos.

### 1.2.2 Específicos

A crescente complexidade das questões enfrentadas na gestão dos recursos hídricos torna necessária a adoção de novas tecnologias. Nesse sentido, a modelagem matemática, via Dinâmica de Sistemas, auxilia nas simulações, na projeção de cenários e no prognóstico da direção do planejamento. Já, a metodologia multicritério possibilita a integração de diversas ferramentas e técnicas em um único sistema. Isso subsidia a escolha dos *trade-offs* que melhor atendem aos interesses dos usuários de recursos hídricos da bacia – sob situação de não-escassez<sup>12</sup> e de não-atendimento<sup>13</sup> da demanda hídrica. Portanto, os objetivos específicos são:

- elaborar cenários das possíveis evoluções dos processos socioeconômicos e demográficos, intervenientes ao planejamento da bacia hidrográfica, a fim de analisar a disponibilidade hídrica para a produção de energia elétrica e para os demais usos múltiplos, e
- representar os vários pontos de vista dos diversos atores sociais envolvidos e afetados pela tomada de decisão sobre a prioridade de uso das águas (*trade-off* entre os usos múltiplos) e, desta maneira, analisar o futuro em razão dos valores auferidos aos *trade-offs* no presente, por meio de um modelo dinâmico.



<sup>12</sup> Quando é declarado escassez, não existe necessidade de estabelecer os *trade-offs* para estipular os volumes de água para cada uso múltiplo, pois nesta situação o uso dos recursos hídricos é direcionando para dessedentar homens e animais (Brasil, 1997).

<sup>13</sup> Quando a oferta de recursos hídricos é superior a demanda, não existe necessidade de estabelecer os *trade-offs* para estipular os volumes de água para os usos múltiplos numa bacia hidrográfica, pois a oferta é superior ao volume total outorgado.

### 1.2.3 Resultado esperado

Elaboração de cenários do comportamento da geração de energia elétrica e da disponibilidade hídrica para produção de energia elétrica diante de soluções Pareto-relevantes, segundo a série de afluências, a demanda hídrica outorgada e os *trade-offs* auferidos aos usos múltiplos em uma bacia pelo Comitê de Bacia Hidrográfica.

## 1.3 Justificativa

A disponibilidade dos recursos naturais de potencial energético sempre esteve vinculada ao desenvolvimento econômico das sociedades. Todavia, o aumento de consumo de energia não implica necessariamente aumento do nível de desenvolvimento ou de bem-estar social. Ora, a distribuição dos benefícios sociais adquiridos com o desenvolvimento não ocorre de maneira equitativa, pois como observa Celso Furtado (2002, p. 08)

*nada choca tanto o observador da economia brasileira como a contradição entre o formidável potencial de recursos do país e o baixo nível de desenvolvimento alcançado por este até o presente.*

A oferta de energia elétrica, na economia nacional, é uma função que depende substancialmente da disponibilidade hídrica para tal fim. Entretanto, a totalidade da vazão natural afluyente não está disponível somente para a produção de energia elétrica como em tempos de outrora. As prioridades para o uso das águas, consuntivos ou não consuntivos, estão à mercê das definições e dos valores dos atores sociais afetados pelo Plano de Bacia<sup>14</sup>. Portanto, a alocação da disponibilidade hídrica para os diversos segmentos usuários deve apoiar-se na interação entre os processos econômico, social e ambiental (Figura 1.3).

O modelo de planejamento integrado a ser seguido deve permitir o julgamento de valor, ser participativo e multicritério, além de projetar cenários coerentes com a composição orgânica do capital econômico, social e natural.



<sup>14</sup> As prioridades de uso entre cada segmento usuário dos recursos hídricos devem estar estabelecidas no Plano de Bacia, elaborado pela Agência de Água e sujeito à aprovação pelo respectivo Comitê de Bacia Hidrográfica. Ou seja, em situação de não-escassez e salvo determinação disposta no Plano de Bacia, o setor de energia elétrica é tão importante quanto os demais segmentos.

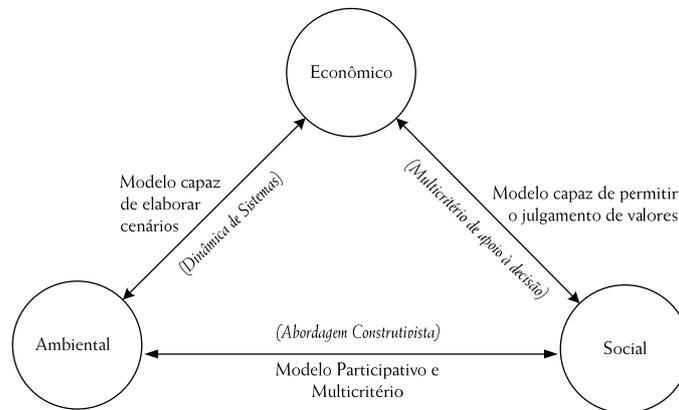


Figura 1.3 Abordagem para o planejamento integrado

Destarte, as reflexões provocadas pela crise energética de 2001 sobre o modelo setorial<sup>15</sup> e os usos múltiplos dos recursos hídricos foi um dos fatos motivadores para relacionar os setores de energia elétrica e de recursos hídricos por meio do planejamento integrado.

## 1.4 Metodologia

Os métodos científicos são estritamente necessários para que a pesquisa seja considerada da científica. O conhecimento científico é alcançado por uma ampla área de saberes, tal como as ciências humanas, política, econômica, biológica, etc. Ilya Prigogine, um notável físico-químico ganhador do Prêmio Nobel de Química, em 1977, afirmou que

*a ciência para o benefício da humanidade somente é possível se uma atitude científica for profundamente arraigada na cultura como um todo. Isto implica certamente na melhor disseminação da informação científica para o público de um lado, mas do outro, em um melhor entendimento dos problemas do nosso tempo pela comunidade científica (Prigogine e Stengers, 1979)*

Nesse sentido, desenvolver um trabalho científico em uma área do saber específica não deveria ser dissociado das demais áreas, ou seja, mais do que o aprofundamento é necessário, também, um acultramento. Todavia, o resultado deste trabalho científico pode

<sup>15</sup> Não me refiro aos modelos matemáticos utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

romper com a imagem positivista<sup>16</sup> da prática científica reconhecida como fonte geradora de um conhecimento verdadeiro e seguro. Para tanto, o conhecimento gerado à compreensão científica tecnológica e prognóstica deveria prover um processo de conhecimento aberto a autocrítica que privilegie a visão da totalidade (enfoque sistêmico), não obstante a necessidade de busca na precisão das partes. Desse modo, não se trata de um conhecimento científico pautado de certezas, mas sim de possibilidades.

O método científico é uma forma de organizar o raciocínio e, dentre os métodos existentes, o hipotético-dedutivo proposto por Karl Popper (1975; 1977) se adéqua a este trabalho acadêmico em tema e organização. Esse método considera o conhecimento científico como sendo um processo de especulação controlada (Harvey, 1969). Para tanto, são estabelecidas condições e hipóteses a serem ratificadas ou refutadas.

Popper (1975), por meio do método hipotético-dedutivo, promoveu uma ruptura radical ao método indutivo positivista, afirmando que a ciência não é capaz de atingir a verdade, mas apenas soluções temporárias para os problemas que enfrenta. Assim, quando uma nova teoria responder de forma diferente, ou melhor, ao problema suscitado, a primeira teoria estará refutada, ou seja, para que uma teoria seja considerada consistente é necessário submetê-la ao processo de falseamento.

Para tanto, Popper interpretou a tríade dialética (tese, antítese, síntese) por meio de tentativa e eliminação do erro:  $P_1 \rightarrow TT \rightarrow EE \rightarrow P_2$ . A partir de um problema,  $P_1$ , obtém-se uma solução provisória, uma teoria-tentativa,  $TT$ , a qual após ser criticada, com vistas à eliminação do erro,  $EE$ , resulta num novo problema modificado,  $P_2$ . Desse modo, assim como a dialética, esse processo renova-se a si mesmo por meio do falseamento (Popper, 1977, p. 141).

Dessa forma, Popper sugere os seguintes procedimentos: a verificação do problema; a formulação das hipóteses; e, o desenvolvimento do processo de falseamento destas hipóteses com o objetivo de refutá-las. Todavia, primeiramente, deve-se caracterizar o sistema a ser modelado, haja vista que isso delimita o sistema e, conseqüentemente, o modelo<sup>17</sup>. A



<sup>16</sup> Refiro-me a ao positivismo de Augusto Comte, em virtude de agrupar o que foi separado pela Lei dos Três Estados (Aron, 1993, p. 69-128)

<sup>17</sup> Por exemplo: a bacia hidrográfica corresponde à área drenada por um rio ou um conjunto de rios.

delimitação do sistema é necessária para investigar a estrutura e o comportamento, do mesmo modo que a identificação e a qualificação dos componentes (partes) do sistema (todo).

A modelagem é um procedimento que consiste em compor uma abstração da realidade, em função das concepções de mundo. O modelo, então, inicia-se a partir de como a realidade<sup>18</sup> está estruturada. A teoria, nesse caso, fornece consistência e um conjunto de enunciados para o delineamento do problema, ou seja, “de problemas ou de questões práticas de uma teoria que caiu em dificuldades. Uma vez que se defronta com um problema, pode-se começar a trabalhar nele” (Popper, 1975).

Existem vários ambientes de implementação e linguagem de representação de modelos de sistemas por processos e fluxos. Entretanto, para sistematização da simbologia descritiva, três formas devem ser aludidas: Chorley e Kennedy (1971), Odum (1983, 1996) e, em especial, Forrester (1961, 1968, 1969, 1973).

Diante do exposto, o modelo deste trabalho se insere no procedimento metodológico hipotético-dedutivo, dado que expressa uma estrutura elaborada em decorrência de hipóteses ou explicações a fim de integrar a operação de usinas hidrelétricas para a produção de energia elétrica e os usos múltiplos das águas em bacias hidrográficas.

Por meio da simulação serão obtidos cenários do comportamento dos recursos hídricos para os usos múltiplos, em especial para geração de energia elétrica. Cada cenário está relacionado aos *trade-offs* entre os usos múltiplos, portanto ao constatar um cenário indesejado, refutam-se os *trade-offs*. A ciência não é fruto de um roteiro de criação inflexível, uma vez que existe mais de uma forma de raciocínio.

## 1.5 Estrutura do trabalho

A mutualidade entre os setores de energia elétrica e de recursos hídricos é o assunto do Capítulo 2, além dos aspectos jurídicos e institucionais relevantes que condicionam a modelo. O Capítulo 3 elucida sobre a bibliografia disponível, metodologias e aplicações da



<sup>18</sup> Um dos principais problemas da ciência não é o método propriamente dito, mas a realidade. Como o problema não é evidente e nem tão pouco coincide completamente com a idéia que se tem da realidade, é preciso, primeiramente, colocar a seguinte questão: o que se considera real? (Demo, 1980, p. 16).

teoria de Dinâmica de Sistemas e da metodologia multicritério pertinentes ao mote deste trabalho. Do mesmo modo, expõe-se o contexto atual do planejamento integrado dos setores de energia elétrica e de recursos hídricos.

Os procedimentos de modelagem, o modelo propriamente dito, e as simulações são o conteúdo do Capítulo 4. Já, o Capítulo 5 trata das conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, o Apêndice A aborda gestão dos recursos naturais renováveis e o Apêndice B expõem os dados de entrada e as tabulações consideradas no modelo de simulação.

## CAPÍTULO

# 2

# PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS

**A**SSIM como em outras épocas e civilizações, o desenvolvimento econômico pode ser mais intenso nas regiões de relativa abundância de recursos hídricos. No entanto, a seleção de projetos e as alternativas de sistemas de recursos hídricos apenas por meio de análises de custo/benefício, com forte tendência à eficiência econômica restrita<sup>19</sup>, são criticadas há tempo.

Segundo Braga (1987, p. 458), no início do Século XX, nos Estados Unidos, “os objetivos do planejamento visavam à segurança nacional e a saúde”. Então, até meados da

☞ \_\_\_\_\_

<sup>19</sup> Herman E. Daly e John B. Cobb, na obra “Para o Bem Comum”, afirmam que as economias ortodoxas, baseadas no crescimento imperativo (Consenso de Washington), trabalham com uma definição limitada de capital. Tal definição considera apenas os ativos antrópicos como bens, serviços, máquinas, entre outros, entretanto, omite, do equacionamento econômico-financeiro, os recursos que proporcionam toda a atividade econômica viável – o capital natural (Daly e Cobb, 1989).

década de 1960 (quando predominou o intenso desenvolvimento econômico), os projetos federais americanos eram aprovados segundo a relação custo/benefício, fundamentada na eficiência econômica restrita.

Porém, em 1973, o Conselho de Recursos Hídricos norte-americano (*Water Resources Council*) decidiu incorporar múltiplos objetivos para o planejamento dos recursos hídricos (NWC, 1973), a saber:

- o desenvolvimento econômico nacional ;
- o desenvolvimento econômico regional;
- a qualidade ambiental; e
- o bem-estar social.

A necessidade de incorporar aspectos de natureza social e ambiental no planejamento emergiu com o decorrer do tempo e das mudanças culturais. Atualmente, a ênfase é dada à preservação da qualidade do meio ambiente.

No Brasil, o desenvolvimento econômico começou mais incisivamente a partir de meados de 1970. Nesse período, os empreendimentos no setor de recursos hídricos “foram projetados e executados contemplando um único uso, em geral a geração de energia elétrica e um único objetivo a maximização da eficiência econômica nacional” (Braga, 1987, p. 458).

Todavia, a partir de meados de 1990, os anseios da sociedade brasileira pediam por uma maior participação no processo decisório, redirecionando os propósitos do planejamento para que os objetivos sociais e ambientais fossem tão importantes quanto os econômicos.

## **2 Mutualidade entre os setores de recursos hídricos e de energia elétrica**

As recentes modificações na legislação e gestão dos recursos hídricos reforçaram a necessidade de reavaliação das metodologias e dos modelos utilizados para a tomada de decisão. Isso acarreta significativas alterações no uso dos recursos hídricos pelo setor de energia elétrica.

Do mesmo modo, as demandas ambientais e de uso múltiplo das águas, além do crescimento econômico, provocam, cada vez mais, impacto no uso dos recursos hídricos para

geração de energia elétrica. O planejamento e a operação do setor de energia elétrica são profundamente afetados em casos de estiagem ou ao atender os usos prioritários de interesse coletivo, como a navegação ou prevenção de danos ambientais (Antunes, 2002, p. 599-600).

O compartilhamento das águas por diversos agentes econômicos exige a implementação de regras operacionais complexas, além do exercício efetivo do planejamento integrado. De acordo com Lanna (2002a, p. 745-6), a complexidade aumenta substancialmente em decorrência de pressões motivadas:

- pelo desenvolvimento econômico - aumento da demanda de água para uso intermediário e final;
- pelo crescimento da população - aumento do consumo final, de forma direta, e crescimento da demanda para uso intermediário, de forma indireta, em virtude da necessidade de empregos e de atividades econômicas;
- pela expansão da agricultura - aumento das culturas dependentes de irrigação;
- pelas modificações tecnológicas e sociais - alteração nos modos de produção e de consumo da sociedade;
- pela urbanização - alteração na organização espacial concentrando a demanda por água, impermeabilizando o solo e conseqüentemente agravando os efeitos de enchentes; e
- pelas demandas ambientais - aumento da degradação impulsiona de forma categórica os movimentos sociais e as exigências legais, a fim de preservar os recursos hídricos.

Mais do que a exigência legal, o planejamento integrado de recursos, entre os setores de energia elétrica e de recursos hídricos, é uma necessidade urgente e um desafio para elaboração de instrumentos adequados às diversidades demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do Brasil.

## 2.1 Planejamento integrado de recursos

A reestruturação ocorrida nos setores de energia elétrica e de recursos hídricos, em diversos países, acarretou a necessidade de novos paradigmas para os planejadores destes setores. Os conceitos de poluição ambiental, recursos renováveis e desenvolvimento sustentável foram disseminados por grupos e organizações que se caracterizam por fortes

pressões sobre a expansão das atividades do setor de energia elétrica (Jannuzzi e Swisher, 1997, p. 11).

As demandas que têm sido feitas sistematicamente pelos grupos ambientalistas ao governo e aos agentes setoriais são atendidas à medida que são consideradas seriamente as alternativas do lado da demanda como também a redução de impactos sociais e ambientais negativos ainda na fase de elaboração e seleção dos projetos.

Desse modo, o planejamento integrado de recursos (PIR) passou a ser aplicado nos setores de energia elétrica e de gás canalizado a partir de meados da década de 1980 em alguns países, entre os quais se destacam os Estado Unidos, o Canadá e a Dinamarca. O PIR é a forma mais avançada de planejamento que se conseguiu estabelecer para esses setores; ele foi aplicado, no passado, sobretudo para empresas concessionárias verticalmente integradas (Sica e Camargo, 2004d).

A dificuldade de implementar mudanças na economia de mercado (como por exemplo: a internalização dos custos ambientais e sociais) agrava-se em virtude das diferenças de poder e acesso ao capital entre os diversos grupos afetados. Todavia, o PIR analisa, de uma forma explícita e eqüitativa, um grande número de opções de suprimento e de ações sobre a demanda, internalizando os custos sociais e ambientais associados às diferentes opções. Esse tipo de planejamento incentiva a participação do público interessado e efetua uma avaliação dos riscos e das incertezas oriundos de fatores externos ao exercício de planejamento (Sica, 2003; Camargo e Borenstein, 1997; Jannuzzi e Swisher, 1997). Desse modo, o planejamento integrado tem sido usado para atenuar essa dificuldade e aumentar os incentivos para o uso mais eficiente das águas e da energia, seguindo o princípio do desenvolvimento sustentável.

## 2.2 Gestão descentralizada dos recursos hídricos

A gestão dos recursos hídricos é profundamente afetada diante da miscelânea de usos possíveis e da incerteza sobre a forma de usos finais, pois os recursos hídricos podem se transformar de recurso potencial em atual, de acordo com os efeitos do progresso tecnológico e das necessidades sociais.

Ademais, é fundamental sustentar condições mínimas para a reprodução dos recursos naturais renováveis, pois estes asseguram as condições das atividades econômicas, embora

exista a concepção de que a gestão prospectiva dos recursos, no longo prazo<sup>20</sup>, seja um custo contraproducente e suplementar à atividade econômica produtiva.

A gestão dos recursos hídricos subjugada aos diversos interesses econômicos do Estado, de órgãos privados e dos demais usuários estimula uma grande variedade de propostas entre os diferentes atores sociais (*stakeholders*), que compõem os Comitês de Bacia. Tais propostas possuem enfoques explicitamente formalizados, que podem ser reduzidos em três tipos principais (Ollagnon, 2002, p. 173-5): econômicos, ecológicos e técnico-administrativos.

Pelo enfoque econômico, as águas são percebidas como recursos para o atendimento de necessidades imediatas. Esse enfoque pode subsidiar discursos e decisões centradas na exploração, podendo ocasionar a rápida degradação e perda substancial do capital natural (Sica e Camargo, 2004a).

O enfoque ecológico trata as águas como algo a ser protegido visando à integridade dos sistemas ambientais de maneira absoluta – economia estacionária. Conquanto, há uma proposta menos rígida baseada na co-evolução com as necessidades econômicas, por meio de um equilíbrio dinâmico das relações entre o homem e seu meio.

Já, o enfoque técnico-administrativo considera as águas como um objeto de gestão social sob a ótica do recurso e do meio natural. Porém, o exercício desse enfoque, na prática do nível local, apresenta o risco de induzir uma perda de coerência no nível central e um desgaste da racionalidade explícita.

Esses três tipos de enfoques se diferenciam por suas estruturas, seus discursos e seus procedimentos de ação, contudo são complementares, a não ser que sejam valorizados de forma mutuamente excludente (em detrimento um dos outros).

O sistema administrativo descentralizado se torna vulnerável à paralisia decisória<sup>21</sup> em caso de implementação deficiente. A descentralização dos processos decisórios pode



<sup>20</sup> O ecossistema, no qual está inserido o recurso regulado, pode evoluir, porém não na mesma base de tempo e ritmo que as atividades econômicas e financeiras. Há uma discrepância entre a dinâmica do ecossistema e a dinâmica do sistema econômico.

<sup>21</sup> Utilização freqüente do poder de veto por parte de um determinado grupo social, provocando situações de paralisia do processo decisório.

subestimar o fato das conseqüências das decisões afetarem simultaneamente os níveis local, regional e central. (Sica, Souza e Fernandes, 2005).

Portanto, a questão principal está além da repartição de responsabilidades ou de delimitar poderes, e sim na direção de harmonizar os vários pontos de vista dos *stakeholders*, sendo todos eles, a princípio, legítimos.

A ausência de legitimidade das políticas ambientais tem duas origens distintas (Godard, 2002, p. 245):

- o déficit na elaboração de políticas ambientais; e
- a hesitação que, ao surgir como opção mais apropriada, torna a legitimidade opaca diante de diversas proposições conflitantes e ao mesmo tempo sustentadas de maneira insuficiente em função da especificidade da situação.

Por fim, encontrar a estrutura institucional e a organização do espaço de planejamento capazes de atender às exigências ecológicas, administrativas, jurídicas, econômicas e às tradições históricas é extremante difícil.

## 2.3 Arcabouço jurídico e institucional

A gestão dos recursos hídricos é abordada pela Constituição Federal de 1988, que em seu inciso XIX do art. 21, atribui à União a competência de instituir o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, o qual se baseia na gestão compartilhada das águas por meio da descentralização e da participação da sociedade na gestão pública.

Paulo de Bessa Antunes (2002) sintetiza o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH), por meio da estrutura e dos seguintes objetivos:

- coordenar a gestão integrada das águas;
- arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos;
- implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos;
- planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos; e
- promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos.

Em termos da estrutura hierárquica da organização social (Figura 2.1) integram o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Sica, Souza e Fernandes, 2005):

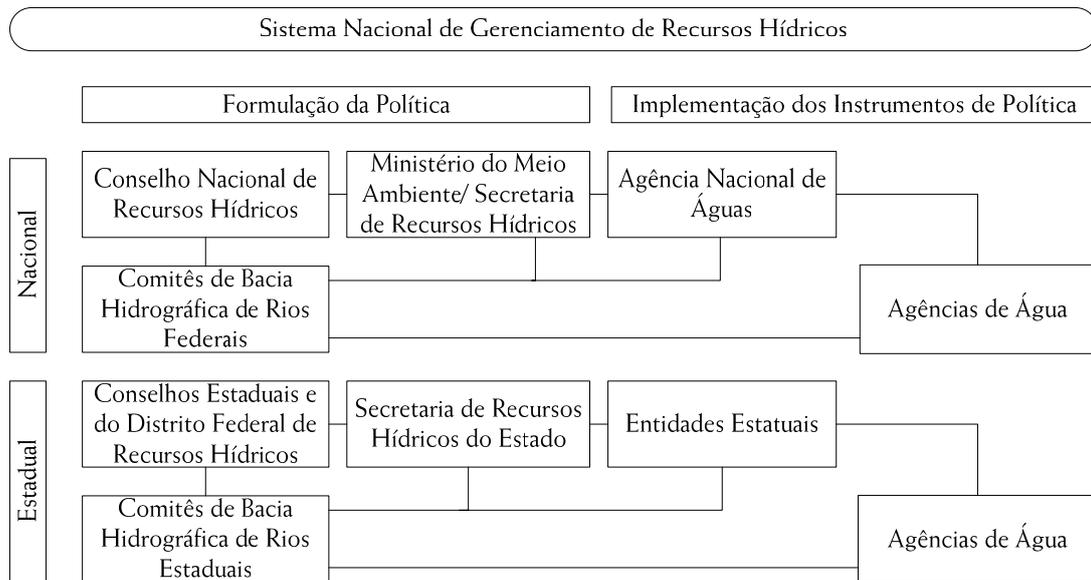


Figura 2.1 Organograma simplificado do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Sica, Souza e Fernandes, 2005)

- o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, competente pelo papel normativo e de articulação do planejamento de recursos hídricos com os planejamentos nacional, regionais, estaduais e dos setores usuários (art. 33 da Lei nº 9.433/97); tendo os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, em linhas gerais, as mesmas atribuições na área de sua competência;
- a Agência Nacional de Águas (ANA), competente pela implementação das políticas formuladas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (art. 4º da Lei nº 9.984/00);
- os Comitês de Bacia Hidrográfica, competentes, dentre outros, por aprovar o Plano de Recursos Hídricos da bacia, prover mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados, além de estabelecer critérios e promover o rateio de custo das obras de uso múltiplo, de interesse comum ou coletivo (art. 38 da Lei nº 9.433/97);
- os órgãos públicos, de âmbito federal, dentre outros, competentes por outorgar os direitos de uso de recursos hídricos, regulamentar e fiscalizar seus usos, bem como promover a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental (art. 29 da Lei nº 9.433/97); e
- as Agências de Água, dentre outras, são órgãos técnicos dos comitês de bacias.

A competência para a definição e a fiscalização das condições de operação de reservatórios por agentes públicos e privados, visando garantir o uso múltiplo dos recursos

hídricos conforme estabelecido nos planos de recursos hídricos das respectivas bacias hidrográficas, está a cargo da ANA, nos termos do inciso XII, do art. 4 da Lei nº 9.984/00, em articulação com o Operador Nacional do Sistema de energia elétrica (ONS), nos termos do §3º do art. 4 da Lei nº 9.984/00. Essa competência é comum e concorrente a outros órgãos da Administração Pública.

A Política Nacional de Meio Ambiente, enquanto instrumento de gestão ambiental, foi definida anteriormente à Política Nacional de Recursos Hídricos, por meio da Lei nº 6.938/81. Nos termos dos incisos III e IV do art. 9 da referida lei, são instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente, a avaliação de impactos ambientais, o licenciamento ambiental e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras.

O Decreto nº 88.351/83, substituído pelo Decreto nº 99.274/90, que regulamenta a Lei nº 6.938/81, no art. 48, vincula a avaliação de impactos ambientais aos sistemas de licenciamento, de competência do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). O referido licenciamento, no que diz respeito a obras de grande porte, notadamente de instalações de geração de energia elétrica, obedece às regras estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 006/87 e pela Resolução CONAMA nº 237/97, que incorporou ao sistema de licenciamento os instrumentos de gestão ambiental.

Definidas, em linhas gerais, a abrangência de cada política, observa-se que somente em 1997, a Política Nacional de Meio Ambiente e a Política Nacional de Recursos Hídricos interagem com os princípios do uso múltiplo das águas e do conceito de gestão da bacia hidrográfica. A interação entre a Política Nacional de Meio Ambiente e a Política Nacional de Recursos Hídricos (preconizada no inciso III, do art. 3 da Lei nº 9.433/97), embora ocorra em tese, na prática merece melhoramentos.

Enquanto a Política Nacional do Meio Ambiente é implementada considerando primordialmente o impacto ambiental, que o empreendimento pode causar no meio ambiente, a Política Nacional de Recursos Hídricos, por sua vez, até por refletir noções mais inovadoras de meio ambiente, é muito mais abrangente ao considerar os demais usos da água e toda a bacia hidrográfica.

Como a bacia hidrográfica é delimitada pela geografia física e não política, e considerando que a importância da bacia depende de vários fatores, principalmente da que

representa para a União, o Estado ou o Município, a gestão das águas por bacia hidrográfica pode efetivar-se, diversamente, de bacia para bacia.

No setor de energia elétrica, compete à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por delegação, nos termos do inciso II, do art. 3 da Lei nº 9.427/96, a outorga de concessão para aproveitamento de potenciais hidrelétricos. O poder público, ao outorgar uma concessão, transfere ao particular a prerrogativa de utilizar um bem público em seu favor, devendo, para tanto, adotar medidas que visem, dentre outras, a utilização racional do recurso. Com esse objetivo, por meio do Decreto nº 2.335/97 regulamentador da Lei nº 9.427/96, foram atribuídas, em relação a utilização dos recursos hídricos, as seguintes competências a ANEEL:

- regular e fiscalizar a conservação e o aproveitamento dos potenciais de energia hidráulica, bem como a utilização dos reservatórios de usinas hidrelétricas;
- promover a articulação com os Estados e o Distrito Federal para o aproveitamento energético dos cursos de água e a compatibilização com a Política Nacional de Recursos Hídricos;
- estimular e participar de ações ambientais voltadas para o benefício da sociedade e interagir com o Sistema Nacional de Meio Ambiente em conformidade com a legislação atuando de forma harmônica com a Política Nacional de Meio Ambiente;
- desenvolver atividades de hidrologia relativas aos aproveitamentos de energia hidráulica e promover seu gerenciamento nos termos da legislação vigente.

### 2.3.1 Aspectos jurídicos relevantes

O aspecto mais relevante da Lei nº 9.433/97 é o estabelecimento de instrumentos econômicos e políticos para realizar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos.

#### 2.3.1.1 Princípios legais que regem a gestão e o planejamento

*1º princípio: a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento.*

Dessa forma, facilita-se o balanço hídrico na área a ser planejada. O planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos são fundamentados no conceito de Bioregião – bacias

formadas naturalmente. A bacia hidrográfica foi definida como unidade de planejamento por duas razões principais:

- as condições das águas, do solo e da superfície na bacia hidrográfica, agem segundo uma dinâmica que sustenta toda a vida na região;
- os fluxos de água, na bacia hidrográfica, não respeitam os limites de países ou de governos locais, portanto induzem à tomada de decisões cooperadas, que superam as divisões burocráticas e políticas.

*2º princípio: os usos múltiplos da água.*

É o princípio mais nobre entre os relacionados e de maior impacto no desenvolvimento econômico da Nação. Todavia, o setor de energia elétrica vinha atuando como único agente no processo de operação, gestão e planejamento. Isso caracterizava a evidente assimetria entre a energia elétrica e os demais usos da água, como irrigação, transporte, navegação, etc.

*3º princípio: o reconhecimento do valor econômico da água.*

O Banco Mundial e o FMI “recomendam” que seja reconhecido o valor econômico da água, pois esta abordagem “induz” ao uso mais racional e serve como fundamento à cobrança pela utilização dos recursos hídricos, contudo isto não implica, necessariamente, em tratar as águas como mercadoria.

*4º princípio: a gestão descentralizada e participativa.*

Esse princípio enfrenta muitas dificuldades para sua implantação. Os agentes econômicos e sociais (usuários da bacia) devem ser representados por grupos, tais como o governo, a sociedade civil organizada; as ONGs e as entidades de classe.

*5º princípio: em situação de escassez de água, a prioridade é dessedentar humanos e animais.*

Desse modo, sob situação de escassez de água na região da bacia hidrográfica, os recursos hídricos são direcionados exclusivamente para matar a sede de humanos e animais.

### **2.3.1.2 Instrumentos básicos**

*1º Plano de recursos hídricos*

Documento que considera o espaço da bacia hidrográfica como unidade básica de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

## *2º Enquadramento dos corpos d'água em classes de usos preponderantes*

A gestão e o planejamento são indissociáveis da quantidade e da qualidade da água, ou seja, este instrumento estabelece metas qualitativas.

## *3º Outorga do direito de uso dos recursos hídricos*

Mecanismo pelo qual o usuário recebe uma autorização ou permissão ou concessão para fazer uso da água com fins econômicos. Entretanto, esse processo, além de considerar as diversas demandas, deve, também, levar em conta os usos múltiplos e a demanda ecológica – responsável pela manutenção do ecossistema.

## *4º Cobrança pelo uso da água*

Instrumento pelo qual se pretende harmonizar a relação entre usuários competidores, promover a internalização e distribuição equânime dos custos socioambientais (internalizar as externalidades) e obter recursos financeiros com o intuito de revertê-los a gestão da bacia hidrográfica.

## *5º Sistema nacional de informações sobre os recursos hídricos*

Sistema pelo qual os *stakeholders* afetados pela gestão e pelo planejamento dos recursos hídricos serão providos de informações necessárias ao processo decisório, porém não implica automaticamente no acesso a informações georeferenciadas. Isso é de fundamental importância para o pleno exercício da cidadania, assim como para diminuir a assimetria de informações que permeia os conflitos pelos usos múltiplos das águas.

### **2.3.2 Comitês de bacia hidrográfica**

O arcabouço institucional introduzido pela Lei nº 9.433/97 estabelece a gestão compartilhada da água. Os comitês formados por representantes dos governos, dos usuários e da sociedade civil organizada deveriam atuar como “parlamento da água”. Porém, pode-se constatar, eventualmente, nos comitês de bacia uma minoria que, por várias formas, é detentora do conhecimento científico ou de outra forma de poder, em contraposição a uma maioria que deles está privada. O linguajar técnico permeia toda estrutura decisória e esta característica pode de certa forma, torna-se um entrave nos mecanismos de gestão das águas, uma vez que a participação conjunta entre os vários *stakeholders*

*apresenta duas características: a primeira, coloca em primeiro plano a importância do corpo técnico científico e do conhecimento produzido por ele nas relações de força*

*no interior dos espaços decisórios da bacia; a segunda, torna mais difícil o envolvimento da população local no processo de gestão pelo fato de ser produzido unilateralmente conhecimento sobre uma das dimensões de seu meio ambiente, os recursos hídricos (Machado e Macedo, 2000, p. 6)*

Nesse sentido, um dos grandes desafios é conciliar a complexidade decisória com a ampla participação, pois os comitês de bacia devem prezar pela pluralidade de idéias e pelo exercício da cidadania, assegurando que a decisão seja tomada tão próxima quanto possível daqueles que são afetados pela mesma. O SNGRH tende a seguir o princípio de subsidiariedade que está relacionado com os princípios de proporcionalidade e da necessidade, isto implica que a União, por meio das instituições federais, não deve transpor a sua esfera de ação a menos que seja necessário para alcançar os objetivos do Estado.

Desse modo, pelo princípio de subsidiariedade a União deve atuar quando requerida por meios jurídicos ou apenas quando sua ação for mais eficaz do que uma ação desenvolvida a nível regional, ou seja, este princípio deve possibilitar certa autonomia decisória aos comitês de bacia. Entretanto, os comitês de bacia se sujeitam

*à primazia de níveis superiores e os influenciam (Conselho Nacional de Recursos Hídricos; conselhos de recursos hídricos estaduais). Nestes fluxos tenta-se evitar o “travamento” das deliberações em função da primazia dos níveis superiores, já que a própria essência dos comitês é sua relativa independência para deliberar sobre assuntos de interesse próprio (Magalhães, 2001, p. 25).*

Por um lado, segundo Caubet (2004) não basta que o comitê adquira poder político suficiente para garantir a autonomia e o sucesso do princípio de subsidiariedade, pois “se existisse o princípio de subsidiariedade em favor do comitê, não seria possível afirmar que caberá recurso contra toda decisão que viesse a tomar<sup>22</sup>”. De outro lado, o recurso faz parte de um Estado Democrático de Direito.

### 2.3.3 Usos múltiplos e prioritários das águas

No Brasil, os conflitos decorrentes de usos múltiplos são fartamente detectados. Por exemplo, Lanna (2002b) descreve problemas entre a geração de energia e a navegação na bacia do Rio Jacuí (RS); entre a atividade mineradora e a qualidade das águas para os demais



<sup>22</sup> O art. 37º, da Lei nº 9.433/97, diz: “Das decisões dos comitês de Bacia caberá recurso ao Conselho Nacional ou aos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, de acordo com sua esfera de competência”.

usuários na bacia do rio Araranguá (SC); no Rio São Francisco intensificam-se, cada vez mais, os conflitos entre a irrigação<sup>23</sup> e a geração de energia elétrica.

Para Rebouças (2004, p. 36), os conflitos entre geração de energia elétrica e irrigação advêm de como é efetuada a outorga de água para irrigação: somente no caso em que não provoque efeitos deletérios na operação de reservatórios de usinas hidrelétricas. Essa política de “protecionismo operativo” inibe a prática dos usos múltiplos, além de dificultar a gestão participativa nos Comitês de Bacia.

Os conflitos pelos usos das águas tendem a crescer proporcionalmente

*à medida que o crescimento populacional aumenta e o nível de desenvolvimento econômico melhora [...] muitos aspectos e componentes do ciclo hidrológico já foram modificados pela ação humana (Tundisi, 2003, p. 1998).*

De acordo com a Lei nº 9.433/97<sup>24</sup>, depois de satisfeitas as necessidades essenciais, deve-se alocar a água em função dos usos prioritários e dos aproveitamentos viáveis.

A ordem de prioridade e o *trade-off* dos usos e aproveitamentos possíveis dependem dos atores sociais interessados e afetados, aglutinados por meio dos Comitês de Bacia Hidrográfica e subsidiados pelas Agências de Água. Dessa forma, o melhor uso das águas é extremamente atrelado às decisões dos Comitês.

Os objetivos do SNGRH (Lei nº 9.433/97, art. 32) deveriam ser atribuídos a um conjunto orgânico de elementos interdependentes (Lei nº 9.433/97, art. 33). Entretanto, isso não ocorre em razão do grau de imprecisão dos objetivos “a serem alcançados por pessoas jurídicas distintas que se encontram freqüentemente em competição política aberta para cumprir os objetivos listados” (Caubet, 2004, p. 182).

A implementação do planejamento de maneira sistêmica e integrada dos recursos hídricos, segundo o Decreto nº 4.613, de março de 2003, deve englobar os seguintes agentes econômicos, divididos em seis categorias: setor de irrigação; instituições de prestação de



<sup>23</sup> Os desperdícios na agricultura são alarmantes. Cerca de 93% dos quase 3 milhões de hectares irrigados no Brasil utilizam os métodos menos eficientes: espalhamento superficial (56%), aspersão convencional (18%) e pivô central (19%). Com o agravo que os dois últimos métodos, além de ineficientes, são intensivos em energia elétrica, cuja produção é função dependente da água (Rebouças, 2004, p. 42).

<sup>24</sup> Art. 1º, Inciso III – “em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais”.

serviço público de água e esgoto; concessionárias e autorizadas de geração de energia elétrica; setor hidroviário e portuário; setor industrial; e setor de pesca e lazer.

Todavia, segundo Caubet (2004, p. 162-3) os pedidos de outorga estão sendo deferidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), sem que as prioridades de uso dos recursos hídricos<sup>25</sup> sejam definidas e sem prévio planejamento, debatido e aprovado pelos Comitês de Bacia. As razões seriam “a pressão exercida pelos usuários e a própria necessidade de implementar instrumentos já operacionais”, porém sem a possibilidade de aguardar a elaboração definitiva do Plano de Bacia.

Entretanto, paralisar o processo de outorga em virtude da ausência do Plano de Bacia ou do próprio Comitê de Bacia pode ser temerário para o efetivo estabelecimento deste novo sistema de gestão das águas.

Os Planos de Bacia são de longo prazo e visam a orientar a implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) nas bacias hidrográficas. O Estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, regulamenta, segundo a Lei estadual nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994, art. 26, os Planos de Bacia, os quais

*têm por finalidade operacionalizar, no âmbito, de cada bacia hidrográfica, por um período de 4 anos, com atualizações periódicas a cada 2 anos, as disposições do Plano Estadual de Recursos Hídricos, compatibilizando aspectos quantitativos e qualitativos, de modo a assegurar que as metas e usos previstos pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos sejam alcançados simultaneamente com melhorias sensíveis e contínuas dos aspectos qualitativos dos corpos de água.*

O conteúdo mínimo dos Planos de Bacia é disposto pelo art. 7º da Lei nº 9.433/97 e, no que diz respeito à produção de energia elétrica, destacam-se os incisos II, III e IV, *in verbis*:

*II - análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo;*  
*III - balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais;*  
*IV - metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis;*

O uso dos recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica está subordinado às prioridades estabelecidas no PNRH, Lei nº 9.433 de 1997, art. 12, a saber:



<sup>25</sup> A Lei nº 9.433/97 dispõe, no Art. 13 que:

*Toda outorga estará condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e deverá respeitar a classe em que o corpo de água estiver enquadrado e a manutenção de condições adequadas ao transporte aquaviário, quando for o caso.*

*Parágrafo único. A outorga de uso dos recursos hídricos deverá preservar o uso múltiplo destes.*

*Art. 12. Estão sujeitos a outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos de recursos hídricos:*

*§ 2º A outorga e a utilização de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica estará subordinada ao Plano Nacional de Recursos Hídricos, aprovado na forma do disposto no inciso VIII do art. 35 desta Lei, obedecida a disciplina da legislação setorial específica.*

Esse artigo afeta não somente as usinas hidrelétricas, mas toda a atividade produtiva de energia elétrica, uma vez que os usos sujeitos à outorga serão cobrados pelo uso dos recursos hídricos (Lei nº 9.433/97, art. 20).

## 2.4 Conclusões

Duas condições, dentre outras, são necessárias para a gestão e o planejamento das águas, por meio dos Comitês de Bacia: a legitimidade externa e a autoridade interna. A primeira condição confere competência legal ao Comitê, de modo que suas decisões presumem-se legítimas e devem ser respeitadas – caso as repercussões não ultrapassem o âmbito da bacia e da sociedade representada pelo Comitê. A segunda condição, de modo semelhante, submete o Comitê à sua própria decisão, ainda que não unânime, de respeitar e desenvolver as regras de utilização dos recursos hídricos.

Não obstante, cabe ao Estado o empenho para alcançar os fins últimos da coletividade, seja a educação dos cidadãos (como em Platão), a ordem social (como em Hobbes), os direitos individuais (como em Locke) ou o contrato social (como em Rousseau). Destarte, a participação, no processo decisório, deve ser

*entendida como a possibilidade de todos os cidadãos terem condições de opinar e influenciar na decisão final relativa às opções coletivas. Isso não é afirmar que o Estado não deva definir ou tutelar os processos de realização da cidadania (Caubet, 2004, p. 113-4).*

A importância das Nações quanto ao uso dos recursos hídricos pode ser medida pela capacidade de otimizar racionalmente a água disponível. A inércia política, tradicional para legislar, é apontada como resultado de idéia de abundância de água no território (Rebouças, 2004, p. 28).

O planejamento integrado será efetivo quando deixar de ser meramente residual, ou seja, quando emergir sua real importância transversal aos demais segmentos econômicos e deixar de administrar o que sobra das águas, depois que os principais agentes econômicos

tomaram suas decisões e fizeram seus planos. Uma das principais conseqüências do planejamento isolado dos outros setores econômicos é o aumento dos conflitos de uso que se somarão aos já existentes. O planejamento integrado não será uma opção do planejador, e, sim, uma necessidade diante do crescimento e do desenvolvimento econômico.

## CAPÍTULO

# 3

## ABORDAGENS METODOLÓGICAS

O TRABALHO científico tem como meta a compreensão interpretativa da ação a fim de obter uma explicação de suas causas, de seu curso e dos seus efeitos. A objetividade da ciência

*não é produto da imparcialidade do cientista tomado individualmente, mas um produto do caráter social ou público do método científico; e a imparcialidade do cientista individual é, na medida em que, não a fonte, mas o resultado desta objetividade social ou institucional organizada da ciência (Popper, 1966, p. 219-20)*

Nesse sentido, este Capítulo apresenta a revisão das metodologias e técnicas utilizadas e testadas durante os estudos desta tese, além de abordar outros trabalhos desenvolvidos que utilizaram a Dinâmica de Sistemas e as técnicas ou metodologias multicritério no âmbito do planejamento dos setores de energia elétrica e dos recursos hídricos. Dessa forma, ressalta-se que uma das contribuições deste trabalho acadêmico, após

testar diversas técnicas e métodos apresentados, é a abordagem conjunta dos métodos de otimização multicritério (multiobjetivo) e de Dinâmica de Sistemas.

## 3 Multicritério e Dinâmica de Sistemas

A abordagem metodológica deste trabalho acadêmico possui duas características distintas: (i) o modelo proverá cenários do comportamento do recurso hídrico, simulando por meio da Dinâmica de Sistemas; (ii) a cada estágio de simulação, caso a demanda pelo recurso seja superior a sua oferta sob situação de não-escassez, executa-se um procedimento multicritério para alocar o recurso hídrico conforme os *trade-offs* estabelecidos.

### 3.1 Multicritério

A abordagem ao problema de alocação dos recursos hídricos deve proporcionar a inclusão da subjetividade do decisor na otimização do referido problema. Como cada decisor tem objetivos diferentes e atribui uma importância econômica e social diferente para o uso dos recursos hídricos, faz-se necessária uma análise multiobjetivo. Dessa forma, esta seção trata dos diversos métodos multiobjetivo (multicritério) factíveis.

O ambiente decisório no Comitê de Bacia Hidrográfica é caracterizado pelos aspectos subjetivos dos *stakeholders*, pela busca da solução de compromisso ou consenso e pelo valor social atribuído às águas, por meio de *trade-offs*, entre outros meios.

#### 3.1.1 Trade-offs e taxa marginal de substituição

O *trade-off*,  $\Lambda_{ij}$  reflete a relação do incremento de uma unidade, no valor do critério  $c_1$ , em detrimento do critério  $c_2$ , para uma mesma ação. Segundo Chankong e Haimes (1983), é obtido por meio do comportamento de  $f_1$  e  $f_2$

$$\Lambda_{ij} = \Lambda_{ij}(c_1, c_2) = \frac{f_1(c_1) - f_1(c_2)}{f_2(c_1) - f_2(c_2)} \quad (3.1)$$

sendo  $f_2(c_1) - f_2(c_2) \neq 0$

O *trade-off* global,  $\Lambda_{ij}^G$ , que representa o melhor desempenho de um critério,  $c^* \in \mathbb{S}$ , para duas funções,  $f_1$  e  $f_2$ , pode ser definido matematicamente, segundo Kaliszewski e Michalowski (1995; 1997), desde que  $c^* \in \mathbb{S}$ , em que  $\mathbb{S}$  é a região viável, da seguinte forma:

$$\Lambda_{ij}^G = \Lambda_{ij}^G(c^*) = \sup_{c \in \mathbb{S}_j^>(c^*)} \frac{f_i(c^*) - f_i(c)}{f_j(c) - f_j(c^*)} \tag{3.2}$$

em que  $\mathbb{S}_j^>(c^*) = \{c \in \mathbb{S} \mid f_j(c) > f_j(c^*), f_i(c) \leq f_i(c^*)\}_{i=1, \dots, k, i \neq j}$

Caso os comportamentos dos desempenhos dos critérios  $c_1$  e  $c_2$ , nas funções  $f_1$  e  $f_2$  sejam contínuos e diferenciáveis, o *trade-off*,  $\Lambda_{ij}$  é definido como

$$\Lambda_{ij}(c^*) = \frac{\partial f_i(c^*)}{\partial f_j} \tag{3.3}$$

Todavia, após definido, o *trade-off* pode não refletir o comportamento esperado de acordo com as preferências do decisor. Então, uma segunda possibilidade é a definição das taxas marginais de substituição para os critérios  $c_1$  e  $c_2$ . Essas taxas estão situadas nas curvas de indiferença sob o contorno da função valor/utilidade implícita do decisor, conforme Figura 3.1.

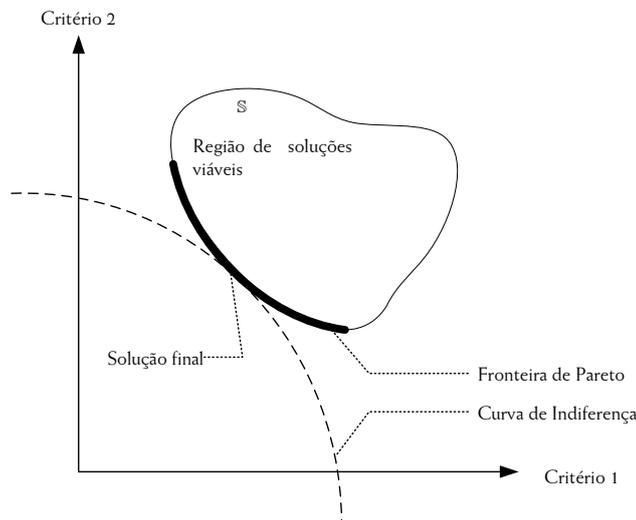


Figura 3.1 Ótimo de Pareto sob a curva de indiferença, adaptado de Miettinen (1999, p. 28)

A taxa de marginal de substituição,  $m_{ij} = m_{ij}(c^*)$  representa a preferência do decisor sobre um critério, ou seja, é a perda de desempenho de um critério que, segundo o decisor, compensa o ganho de uma unidade de valor no desempenho de outro critério, enquanto

todos os demais critérios permanecem constantes. Portanto, segundo Passy e Levanon (1984), tem-se

$$m_{ij} = \frac{\frac{\partial U(f(c^*))}{\partial f_i}}{\frac{\partial U(f(c^*))}{\partial f_j}} \quad (3.4)$$

sendo  $-m_{ij} = \Lambda_{ij} \quad \forall i, j = 1, \dots, n, i \neq j$

### 3.1.2 Métodos de otimização multiobjetivo

Gerar um conjunto de soluções Pareto-relevantes<sup>26</sup> não basta, é necessário encontrar a solução ótima de Pareto. Para tanto, todavia, não é preciso obter o conjunto de todas as soluções Pareto-relevantes para alcançar o Ótimo de Pareto. Matematicamente, para um problema de minimização tem-se:

$$\begin{aligned} \min \quad & \{f_1(c), f_2(c), \dots, f_i(c)\} \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.5)$$

em que  $c^* \in \mathbb{S}$  é o ótimo de Pareto se não existir outro  $c \in \mathbb{S}$  tal que  $f_i(c) \leq f_i(c^*) \quad \forall i = 1, \dots, k$  e  $f_j(c) < f_j(c^*)$  para ao menos um índice  $j \neq i$ . Já, quando se pretende maximizar os desempenhos de funções que implicam em benefícios, Goicoechea *et al* (1982) definiu as soluções viáveis para o problema

$$\begin{aligned} \max \quad & \{f_1(c), f_2(c), \dots, f_i(c)\} \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.6)$$

como o conjunto delimitado por  $\{c : c \in \mathbb{S}, \text{ não há outro } c^* \in \mathbb{S} \text{ tal que } f_j(c^*) > f_j(c) \text{ para algum } j \in \{1, 2, \dots, k\} \text{ e } f_i(c^*) \geq f_i(c) \quad \forall i \neq j\}$ .



<sup>26</sup> Uma solução que proporcione a internalização de externalidades econômicas e conduz a uma melhoria do Ótimo de Pareto, ou seja, um ganho social líquido, é denominada Pareto-relevante (Fauchaux e Noel, 1995, p. 219-20). A externalidade econômica é toda aquela atividade econômica que influencia outra atividade, mas não sofre as conseqüências disto sobre o preço de mercado, por exemplo: uma indústria química que emite os resíduos de sua produção em um rio que abastece uma população a jusante da emissão do efluente (Sica, 2003, p. 22-6).

Para se obter o conjunto de todas as soluções, Rosenthal (1985) sugere três classes de métodos:

- métodos para gerar o conjunto de soluções de Pareto;
- métodos que maximizam a função valor explicitada pelo decisor; e
- métodos que maximizam a função valor implícita de forma interativa.

Entretanto, a classificação mais usual proposta por Hwang e Masud (1979) e, seguida por Miettinen (1999), sugere quatro classes de métodos de acordo com a participação do decisor no processo decisório:

- métodos em que a informação de preferência do decisor não é utilizada;
- métodos em que a informação da preferência do decisor é utilizada *a posteriori*;
- métodos em que a informação da preferência do decisor é utilizada *a priori*; e
- métodos em que a informação da preferência do decisor é utilizada de maneira interativa e progressiva.

### 3.1.3 Método de não-preferência

Os métodos de não-preferência não consideram as opiniões (valores) do decisor para obter o ótimo de Pareto; nesse sentido, a solução final pode ser aceita ou rejeitada pelo decisor.

#### 3.1.3.1 Método do critério global

Esse método, também conhecido como "programação por compromisso" (Yu, 1973; Zeleny, 1973), minimiza a distância entre a referência e a região viável das soluções Pareto-relevantes. A referência é o melhor desempenho possível de um critério ou o seu *benchmarking*,  $z_i^*$ , e, desse modo, tem-se

$$\begin{aligned} \min & \left( \sum_{i=1}^k |f_i(c) - z_i^*|^p \right)^{1/p} \\ \text{s.a.} & \quad f_i(c) \geq z_i^* \\ & \quad c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.7)$$

O expoente  $p \{1 \leq p \leq \infty\}$  pode ser subtraído da formulação (3.7), segundo Osyczka (1989), da seguinte forma

$$\begin{aligned} \min \quad & \max \left\{ \max \left( \left| \frac{f_i(c) - z_i^*}{z_i^*} \right|, \left| \frac{f_i(c) - z_i^*}{f_i(c)} \right| \right) \right\} \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.8)$$

### 3.1.4 Método a posteriori

Nos métodos *a posteriori*, também chamados de métodos de geração de soluções Pareto-relevantes, o decisor seleciona a solução mais conveniente dentre as geradas. Há, entretanto, duas desvantagens:

- existe, geralmente, um tempo computacional excessivo; e
- existe uma dificuldade, por parte do decisor, em selecionar a solução mais conveniente dentre as inúmeras soluções viáveis.

O equacionamento dos problemas de otimização multiobjetivo por meio de métodos *a posteriori* é dividido em duas classes: a primeira objetiva encontrar todas as soluções Pareto-relevantes, e, a segunda, apenas, as soluções de fronteira Pareto-relevantes, ou seja, extremas.

#### 3.1.4.1 Método de pesos

Apresentado por Gass e Saaty (1955) e Zadeh e Desoer (1963), este método tem por objetivo otimizar as funções de desempenho de cada critério, sendo associado um coeficiente (peso) a cada função, transformando um problema multiobjetivo em mono-objetivo, conforme

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^k w_i f_i(c) \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{i=1}^k w_i = 1, w_i \geq 0, \forall i = 1, \dots, k \\ & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Dessa forma, assumindo que exista um ótimo de Pareto  $c^* \in \mathbb{S}$  para um problema multiobjetivo convexo, haverá um vetor  $w$  ( $w_i \in \mathbb{R}_+, i = 1, \dots, k$ ) correspondente a  $c^*$ . Isso, contudo, não implica único vetor  $w$  relacionado ao ótimo de Pareto. O conjunto de soluções Pareto-relevantes é obtido por meio da variação dos coeficientes (pesos), desde que  $\sum_{i=1}^k w_i = 1, w_i \in \mathbb{R}_+ \forall i = 1, \dots, k$ . Uma vez fixados os coeficientes, a otimização é efetuada

por rotinas como, por exemplo, o simplex<sup>27</sup>. No entanto, tais rotinas encontram soluções em pontos extremos, e o ótimo de Pareto pode ser uma solução não-extrema.

A variação dos coeficientes é necessária para produzir o conjunto de soluções Pareto-relevantes. Por um lado, todavia, pequenas mudanças, nos coeficientes, podem acarretar alterações de magnitude significativa. Por outro lado, diferentes coeficientes podem produzir vetores de resultados de ordem de valor muito próximos. A razão deste comportamento, é que o problema (3.9), segundo Miettinen (1999, p. 83), não é uma função Lipschitziana segundo os coeficientes (pesos). Uma função  $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é localmente Lipschitziana

*no ponto  $c^* \in \mathbb{R}^n$  se existir uma constante  $k$  tal que  $|f_i(c_1) - f_i(c_2)| \leq k|c_1 - c_2|$ ,  $\forall c_1, c_2 \in \mathbb{F}$ , sendo  $\mathbb{F}(c^*, d)$  um espaço métrico e será contínua se  $d(f_i(c_1), f_i(c_2)) \leq kd(c_1, c_2)$ ,  $\forall c_1, c_2 \in \mathbb{F}$  (Miettinen, 1999, p. 9-11).*

#### 3.1.4.2 Método de pesos como método a priori

O método de pesos pode ser utilizado, *a priori*, caso o decisor atribua suas preferências ao vetor de coeficientes dos critérios. Assim, os coeficientes são tratados como taxas marginais de substituição, a saber

$$m_{ij} = \frac{w_j}{w_i} \quad (3.10)$$

Outrossim, esse método pode ser iterativo, ou seja, a cada iteração o vetor de coeficientes pode ser modificado pelo decisor de forma direta, ou por uma função que representa o comportamento do coeficiente, segundo o decisor.

#### 3.1.4.3 Método de $\epsilon$ -restrições

Nesse método, de acordo com Haimes *et al* (1971), uma das funções de desempenho é selecionada para ser otimizada, e as demais são convertidas em restrições limitadas pela variável  $\epsilon_i$  como em

---

☞

<sup>27</sup> Steuer (1986, pp. 99-119) e Ehrgott (2005, pp. 172-188) apresentam uma rotina modificada do simplex capaz de determinar todas as alternativas ótimas de um problema multiobjetivo.

$$\begin{aligned}
\min \quad & f_l(c) \\
\text{s.a.} \quad & f_i(c) \leq \varepsilon_i \quad \forall i=1, \dots, k \quad i \neq l \\
& c \in \mathbb{S}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

em que  $l \in \{1, \dots, k\}$

O método  $\varepsilon$ -restrição pode ser conjugado com o método de pesos e com as taxas de *trade-off*. Para tanto, caso a solução pelo método de pesos seja  $c^* \in \mathbb{S}$ , então,  $w \in \mathbb{R}_+^k$  corresponde ao vetor de coeficientes, em que  $k$  é o número total de funções de desempenho. Portanto, existe um vetor  $w \in \mathbb{R}_+^k$ , em que  $c^*$  é a solução da Equação (3.11) ao minimizar a função  $f_l(c)$ , tendo  $\varepsilon_i = f_i(c^*) \quad \forall i=1, \dots, k, i \neq l$  e  $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ . Desse modo, Chankong e Haimes (1983) apresentaram a seguinte formulação:

$$\begin{aligned}
\min \quad & f_l(c) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^k \mu_i f_i(c) \\
\text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

a qual pode ser, segundo Benson e Morin (1977), transformada em uma única função-objetivo irrestrita,

$$\min \quad f_l(c) + \sum_{i=1, i \neq l}^k \lambda_i (f_i(c) - \varepsilon_i) + \sum_{j=1, j \neq l}^m \mu_j g_j(c) \tag{3.13}$$

em que  $\mathbb{S} = \{c \in \mathbb{S} \mid g(c) = (g_1(c), \dots, g_m(c))^T \leq 0\}$ ,  $g_j(c)$  representa as restrições de igualdade;  $\lambda \in \mathbb{R}^{k-1}$  e  $\mu \in \mathbb{R}^m$  são denominados multiplicadores de Lagrange.

Os multiplicadores de Lagrange e de Karush-Kuhn-Tucker são equivalentes às taxas de *trade-off*, segundo Chankong e Haimes (1983), desde que  $c^* \in \mathbb{S}$  seja a solução para o problema, existindo os vetores  $\lambda \in \mathbb{R}_+^{k-1}$ ,  $\mu \in \mathbb{R}_+^m$  e as seguintes condições sejam satisfeitas:

- $\nabla f_l(c^*) + \sum_{i=1, i \neq l}^k \lambda_i \nabla (f_i(c^*) - \varepsilon_i) + \sum_{j=1, j \neq l}^m \mu_j \nabla g_j(c^*) = 0$ ;
- $\lambda_i (f_i(c^*) - \varepsilon_i) = 0 \quad \forall i \neq l$ ;
- $\mu_j g_j(c^*) = 0 \quad \forall j = 1, \dots, m$ ;

- a Hessiana  $\nabla^2 f_l(c^*) + \sum_{i=1, i \neq l}^k \lambda_i \nabla^2 (f_i(c^*) - \varepsilon_i) + \sum_{j=1, j \neq l}^k \mu_j \nabla^2 g_j(c^*)$  seja definida positiva.

Destarte, para o problema (3.11), os *trade-offs* (Equação (3.3)) são equivalentes, conforme

$$\lambda_i = -\frac{\partial f_l(c^*)}{\partial f_i} \quad \forall i = 1, \dots, k, i \neq l \quad (3.14)$$

em que  $\lambda_i = \lambda_i, \forall i = 1, \dots, k, i \neq l$ .

#### 3.1.4.4 Método híbrido

Esse método descrito por Corley (1980), Wendelle e Lee (1977), é uma combinação dos métodos  $\varepsilon$ -restrição e de pesos. O problema é equacionado conforme

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^k w_i f_i(c) \\ \text{s.a.} \quad & f_j(c) \leq \varepsilon_j \quad \forall j = 1, \dots, k \\ & w_i \in \mathbb{R}_+^* \quad \forall i = 1, \dots, k \\ & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.15)$$

#### 3.1.4.5 Método p-norma

Também denominado de programação por compromisso (Zeleny, 1973), este método assume, diferentemente do método do critério global (3.7), um "peso"  $w_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, k$  e  $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ , para otimizar as distâncias da referência, como em

$$\begin{aligned} \min \quad & \left( \sum_{i=1}^k w_i |f_i(c) - z_i^*|^p \right)^{1/p} \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Caso  $p=1$ , os desvios dos coeficientes são minimizados pelo método de pesos, exceto pela constante  $z_i^*$  - referência/benchmarking. Caso  $p=2$ , os desvios dos coeficientes são minimizados pelo método dos mínimos quadrados. Caso  $p$  seja excluído da formulação, tem-se o equacionamento da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
& \min \alpha \\
& s.a.. \quad \alpha \geq w_i (f_i(c) - z_i^*) \quad \forall i = 1, \dots, k \\
& \quad c \in \mathbb{S} \\
& \quad \alpha \in \mathbb{R}
\end{aligned} \tag{3.17}$$

A influência do valor atribuído a  $p$  foi estudado Ballestero (1997), em problemas de cunho econômico, sob o ponto de vista do risco, o qual afirma que, para um decisor com grande aversão ao risco, devem-se usar valores elevados.

### 3.1.4.6 Algoritmos genéticos

A técnica de Algoritmo Genético (AG) se fundamenta em procedimentos para configurar uma população de indivíduos, em que cada indivíduo constitui uma solução potencial do problema de otimização e é representado por cromossomos que retratam o seu genótipo. Há três tipos de operações por meio de AG (Lui *et al*, 2003, p. 125-146): (i) seleção; (ii) mutação; e (iii) recombinação. Os melhores indivíduos são selecionados pela combinação de genes, que, por exemplo, pode ocorrer com pesos de importância relativa.

Fonseca e Fleming (1993) apresentaram o Algoritmo Genético Multiobjetivo (MOGA) baseado no desenvolvimento de uma população Pareto-relevante ou próxima a esta, por meio de uma função *fitness*, para um indivíduo  $j$ , com função de desempenho

$$F_j(c) = f_i(\phi^j(c)) \tag{3.18}$$

em que  $\phi^j = \{\phi_1^j, \dots, \phi_n^j\}$ , e cromossomos  $\phi_i = \{1, \dots, n\}$ . Portanto, para encontrar uma solução não-inferior (não-dominada), dentre uma população de  $N$  indivíduos, é necessário que não existam outros indivíduos  $k = 1, \dots, N, k \neq j$  tal que

$$\phi_i^k \leq \phi_i^j \quad \forall i = 1, \dots, n \tag{3.19}$$

e  $\phi_i^k < \phi_i^j$  para pelo menos um  $i$ .

Desse modo, os indivíduos são ranqueados e agrupados, a cada iteração com o intuito de construir o conjunto de soluções Pareto-relevantes.

### 3.1.5 Métodos a priori

Para esses métodos, o decisor deve especificar suas preferências e os valores antes de iniciar o processo de solução, o que pode acarretar dificuldades.

#### 3.1.5.1 Método da função valor/utilidade

As escolhas efetuadas pelo decisor, freqüentemente, são baseadas em uma função implícita, cujo comportamento depende da sua formação social e deve lhe permitir avaliar os objetivos por meio de uma escala cardinal<sup>28</sup>. Para tanto, Keeney e Raiffa (1976) classificaram a referida função da seguinte forma:

- a função utilidade  $U: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$ , em que  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$  representa o comportamento do decisor sobre os critérios em avaliação, considera a probabilidade do valor de desempenho de cada critério; e
- a função valor  $V: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$ , em que  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$  representa o comportamento do decisor sobre os critérios em avaliação, não considera a probabilidade do valor de desempenho de cada critério.

Desse modo, para dois critérios diferentes,  $c_1$  e  $c_2$ ,

- se  $U(c_1) > U(c_2)$  ou  $V(c_1) > V(c_2)$ , o decisor prefere  $c_1$  a  $c_2$ ;
- se  $U(c_1) = U(c_2)$  ou  $V(c_1) = V(c_2)$ , o decisor é indiferente a  $c_1$  e  $c_2$ ; e
- se  $U(c_1) < U(c_2)$  ou  $V(c_1) < V(c_2)$ , o decisor prefere  $c_2$  a  $c_1$ .

Nesse método, o decisor deve explicitar matematicamente a forma da função implícita. Todavia, isso pode acarretar dificuldades ao decisor que não for hábil em se expressar numericamente. O problema da função valor é representada por

$$\begin{aligned} \max \quad & V(f_j(c)) \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \tag{3.20}$$

já, para função utilidade, tem-se

☞

<sup>28</sup> A preferência ordinal implica o ordenamento das alternativas (ações/performance) e não considera a intensidade das preferências. Essa abordagem permite, por exemplo, afirmar que a primeira escolha do decisor é preferível à segunda escolha, mas não especifica quão preferível é a primeira opção. A preferência cardinal implica que a intensidade das preferências é quantificada.

$$\begin{aligned} \max \quad & U(f_i(c)) \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.21)$$

ambas podem ser resolvidas por métodos de otimização, desde que não apresentem intransitividade<sup>29</sup> e incomparabilidade<sup>30</sup> (Rosinger, 1985). Contudo, segundo Keeney e Raiffa (1976), o método é restrito a problemas multiobjetivos de auxílio à decisão com a região viável composta por alternativas de solução discretas.

Nesse sentido, o conjunto de soluções Pareto-relevantes é formado por  $n$  alternativas discretas, sendo que cada alternativa possui um valor,  $v_i$  associado ao desempenho de cada critério,  $f_i(c)$ , o qual, por sua vez, tem sua importância ponderada pelo coeficiente,  $w_i$ . Desse modo, uma alternativa,  $a_n$ , com  $k$  critérios pode ser avaliada, segundo Belton e Stewart (2003), sob uma formulação de agregação aditiva

$$V(a_n) = \sum_{i=1}^k w_i v_{in}(f_{in}(c)) \quad (3.22)$$

ou sob uma formulação de agregação produtiva

$$V(a_n) = \prod_{i=1}^k [v_{in}(f_{in}(c))]^{w_i} \quad (3.23)$$

ou, segundo Hobbs e Meier (2000, p. 72-5), sob a utilidade esperada

$$E\{U(a_n)\} = \int_i P_{in}(a_n) u_{in}(f_{in}(c)) da_n \quad (3.24)$$

em que  $P_{in}(a_n)$  é a função densidade-probabilidade do critério  $i$  para alternativa  $n$  e  $u_{in}(f_{in}(c))$ , é a utilidade do desempenho do critério  $i$  da alternativa  $n$ .

A função utilidade de um critério  $i$  que compõe o vetor da alternativa  $n$  pode ser determinada, dentre outras, por uma função quadrática

$$u_i(a_n) = x_1 (f_{in}(c))^2 + x_2 (f_{in}(c)) + x_3 \quad (3.25)$$

ou por uma função exponencial



<sup>29</sup> A transitividade é a propriedade que relaciona, por exemplo, três alternativas de solução  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ , em que a relação de  $c_1$  com  $c_2$  e de  $c_2$  com  $c_3$  acarreta a relação de  $c_1$  com  $c_3$  (Sica, 2003, p. 55-6).

<sup>30</sup> A comparabilidade surge quando é possível, por exemplo, comparar duas ações  $c_1$  e  $c_2$  (Sica, 2003, p. 56).

$$u_i(a_n) = x_1 + x_2 \cdot e^{x_3 \cdot f_m(c)} \quad (3.26)$$

em que  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  são parâmetros de sensibilidade ajustados pelo decisor, e  $u_i(a_n)$  é a utilidade do critério  $i$  para a alternativa  $n$ . A questão de como escolher ou formular a função utilidade é abordada amplamente por Keeney e Raiffa (1976).

### 3.1.5.2 Método do ordenamento lexicográfico

Nesse método, o decisor deve ordenar as funções de desempenho de acordo com a ordem de prioridade absoluta do critério avaliado antes de iniciar o processo de solução. Após o ordenamento, a função de maior importância é otimizada com suas restrições originais, tendo sua solução utilizada, como restrição, na otimização da segunda função, na ordem de prioridade, a fim de garantir a solução da função de maior prioridade e, assim, sucessivamente até a última função,  $k$ , de desempenho.

Um problema de ordenamento lexicográfico é escrito como

$$\begin{aligned} \text{lex} \quad & \min f_1(c), f_2(c), \dots, f_k(c) \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.27)$$

em que a função  $f_i(c) \quad \forall i = 1, \dots, k$  é ordenada de maneira decrescente quanto à prioridade do critério a ela associado.

Há uma correspondência entre os métodos de ordenamento lexicográfico e de pesos, haja vista que, se o segundo método possuir uma discrepância de magnitude elevada entre os coeficientes, terá um comportamento equivalente ao primeiro (Sherali, 1982). O uso do ordenamento lexicográfico é justificado em virtude da maneira sucessiva e fracionada que o decisor toma decisões. Contudo, atribuem-se várias críticas ao método, dentre as quais se ressaltam:

- o decisor, geralmente, encontra dificuldades em obter, de maneira direta, uma ordem de prioridade absoluta às funções de desempenho; e
- a solução da função de desempenho de maior prioridade, caso seja única, sobrepor-se-á às soluções das demais funções.

### 3.1.5.3 Método da programação por metas

O método da programação por metas, apresentado por Charnes *et al* (1955), consiste na especificação de um valor,  $z_i^*$ , como meta para cada função de desempenho,  $f_i(c)$ , com o objetivo de otimizar os desvios entre o comportamento da função e a meta. Após o decisor especificar as metas, deve-se minimizar o desvio

$$\delta_i = \delta_i^- - \delta_i^+ \quad (3.28)$$

em que  $\delta_i^-$  é o desvio negativo, e  $\delta_i^+$  o desvio positivo. Desse modo, tem-se o seguinte equacionamento

$$f_i(c) + \delta_i^- - \delta_i^+ = z_i^* \quad (3.29)$$

O método de programação por metas pode ser conciliado com o método de pesos, para tanto, o decisor deve informar a magnitude da importância de cada meta. Os coeficientes, portanto, representam a prioridade, quando  $w_i > 0$ , ou a penalidade, quando  $w_i < 0$ . A aproximação desses métodos, demonstrada por Charnes e Cooper (1977), resultou em

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^k w_i |f_i(c) - z_i^*| \\ \text{s.a.} \quad & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.30)$$

que pode ser convertida em nova formulação, resultando na Equação (3.33), considerando os desvios das metas como

$$\delta_i^+ = \frac{1}{2} (|z_i^* - f_i(c)| + f_i(c) - z_i^*) \quad (3.31)$$

$$\delta_i^- = \frac{1}{2} (|z_i^* - f_i(c)| + z_i^* - f_i(c)) \quad (3.32)$$

tem-se

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^k w_i^- \delta_i^- + w_i^+ \delta_i^+ \\ \text{s.a.} \quad & f_i(c) + \delta_i^- - \delta_i^+ = z_i^* \quad \forall i = 1, \dots, k \\ & \delta_i^-, \delta_i^+ > 0, \quad \forall i = 1, \dots, k \\ & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.33)$$

A programação por metas é um dos métodos mais aplicados e populares, de acordo com Miettinen (1999, p.129), mas não é indicado para se obterem os *trade-offs*.

#### 3.1.5.4 Método de alcançar a meta

Em muitas situações, o decisor deseja especificar uma solução (meta) e direcionar a busca na região viável o mais próximo possível da meta. Esse método, requer que o decisor especifique a meta,  $z_i^*$  e os "pesos" para cada meta que direcionaram o caminho de busca ao ótimo de Pareto. A Figura 3.2 ilustra a direção de preferência do decisor pelo vetor  $\vec{\theta} = Z^* + w\gamma$ , em que  $Z^* = \{z_1^*, z_2^*, \dots, z_k^*\}$ .

Um problema pelo método de alcançar a meta é formulado, de acordo com Liu *et al* (2003), da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & \gamma \\ \text{s.a.} \quad & f_i(c) - w_i\gamma \leq z_i^*, \quad i = 1, \dots, k \\ & c \in \mathbb{S} \end{aligned} \quad (3.34)$$

em que  $\gamma$  é uma variável auxiliar irrestrita e  $w_i$  é o "peso" normalizado,  $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ .

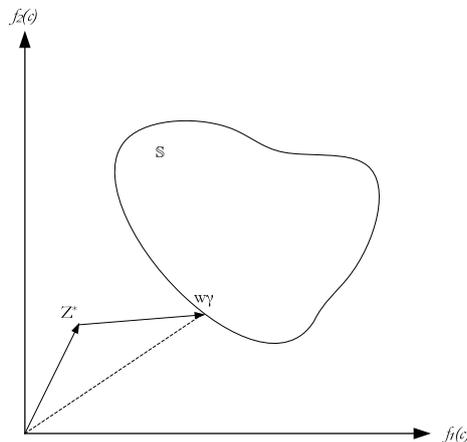


Figura 3.2 Caminho de busca para o método de alcançar a meta

O menor valor de  $\gamma$  ocorre quando o vetor  $\vec{\theta}$  alcança a borda da região viável  $\mathbb{S}$ , (Figura 3.2), portanto a melhor solução de compromisso é afetada tanto pelo peso  $w_i$  quanto pela meta  $z_i^*$ .

Esse método pode ser ampliado para forma interativa, segundo Haimes e Hall (1975), em que o decisor pode alterar os pesos conforme as taxas de intercâmbio - *trade-offs* - entre as metas.

### 3.1.6 Métodos interativos

Das quatro classes de métodos apresentadas, os métodos interativos são os que possuem maior diversidade. Isso se deve, de acordo com Miettinen (1999, p.131), pelo fato de a subjetividade das preferências e as escolhas do decisor serem parte do processo de solução. Todavia, o decisor, usualmente, não tem conhecimento da estrutura completa do processo de decisão, o que dificulta a interação com o método. Em virtude disso, é necessária a inserção da figura do analista, em algumas metodologias, também conhecido como facilitador.

Destarte, o decisor atua em conjunto com o facilitador para atingir os objetivos e/ou comportamentos desejados. Uma vez que o facilitador determina a estrutura de preferência, o decisor atua a cada iteração sobre as preferências até a solução final. A solução encontrada após várias iterações pode não ser ótima, porém, é a melhor possível segundo o conjunto de valores do decisor. Há várias classificações para os métodos interativos, no entanto, de acordo com Vanderpooten (1989) pode se dividir em duas:

- métodos orientados à procura de soluções propostas pelo decisor; e
- métodos orientados ao aprendizado pela exploração das possíveis alternativas viáveis.

O método interativo de substituição do valor de *trade-off* (*Iterative Surrogate Worth Trade-off – ISWT*), baseado no método  $\xi$ -restrição, foi apresentado por Haimes *et al* (1975), tendo, como estudo de caso, o planejamento de recursos hídricos. A idéia principal é maximizar a função valor implícita e o decisor atuar sobre as taxas de *trade-off*, a cada iteração a fim de obter o comportamento desejado.

O método Geoffrion-Dyer-Feinberg (*GDF*), proposto por Geoffrion *et al* (1972), tem os mesmos objetivos do método *ISWT*, mas difere no procedimento. Esse método gera as taxas marginais de substituição para que o decisor as visualize graficamente por meio das curvas de indiferença e, desse modo, maximize a função valor por aproximação.

A técnica de otimização por representação seqüencial, apresentado por Sakawa (1982), usufrui dos meios apresentados pelos dois métodos supracitados, ou seja, usa as taxas de *trade-off* e as taxas marginais de substituição para aproximação e maximização da função valor.

O método *Tchebycheff*, proposto por Steuer (1986), não utiliza a função valor e, sim, um vetor de *benchmarking*, a fim de maximizar a redução do espaço vetorial das metas. A cada iteração um vetor de metas é apresentado ao decisor para que escolha segundo suas preferências e, assim, o espaço de soluções é reduzido.

O método de passo (*Step Method – STEM*), apresentado por Benayoun *et al* (1971), é uma variação do método *Tchebycheff*, porém, nesse método, o decisor assume previamente, a cada iteração, o valor de corte das funções de desempenho – valores aceitáveis e inaceitáveis (Figura 3.4).

Entretanto, qual seria o melhor método multicritério para o problema de planejamento dos recursos hídricos? Essa foi a questão tratada por Hobbs *et al* (1992). A “efervescência” dos métodos interativos se deve muito à necessidade de uma abordagem metodológica que permita incluir no processo de otimização multiobjetivo critérios de cunho qualitativo, possibilitando ao decisor uma participação mais efetiva na definição dos objetivos do planejamento. Para tanto, Keeney e Raiffa (1976), Braga (1979) e Chankong e Haimes (1983) sugerem que um problema multiobjetivo pode ser estruturado de maneira hierárquica para o apoio à decisão, desse modo o planejamento integrado multicritério dos recursos hídricos incorpora os diversos valores dos decisores sobre o uso das águas aos objetivos a serem otimizados.

As metodologias multicritério têm aplicabilidade, segundo Hobbs e Meier (2000, p. 6-8), “num ambiente de incertezas, onde coexistem diferentes alternativas de solução e grupos afetados e sob um quadro de conflitos de valores”. Ademais, oferecem a possibilidade de estruturar o problema decisório além de “qualificar, quantificar e comunicar as prioridades” para o planejamento (Sica, 2003, p. 46).

A resolução de conflitos ambientais, no âmbito dos recursos hídricos, nos países desenvolvidos, está consolidando o uso da Teoria da Decisão, Análise de Decisão e Métodos de Estruturação de Problemas (Magrini e Bredariol, 2001). Tomar uma decisão significa

assumir uma opção com base em princípios racionais e na representação simbólica e cultural do decisor.

Porto e Azevedo (1997, p. 45) afirmam que os sistemas de apoio à decisão devem oferecer dois elementos essenciais. O primeiro elemento é o conjunto de informações que permite conhecer uma determinada situação. Já, o segundo é o modelo que permite identificar as variáveis – suas correlações e interações.

A práxis deve permitir que o decisor “avalie as conseqüências da implementação de suas idéias com o auxílio de modelos aceitos por todos, a partir de uma base comum de informações” (Porto e Azevedo, 1997, p. 47).

Dessa forma, a convergência para uma solução de comprometimento, diante da negociação e participação, torna-se robusta e concreta. Entretanto, não existe uma definição de sucesso para sistemas multicritério de apoio à decisão, pois o melhor sistema “não é obrigatoriamente o que utiliza as melhores técnicas mas aquele capaz de induzir às melhores decisões”. Não obstante, algumas características são relevantes apesar de não garantirem o sucesso:

- aprimorar o julgamento humano e não substituí-lo;
- ser flexível e adaptável às mudanças do contexto decisório;
- ter acessibilidade tanto para usuários especialistas como por usuários com pouco esclarecimento técnico;
- permitir a incorporação de julgamentos de valores;
- permitir a construção do modelo com a participação dos *stakeholders*; e
- possibilitar a incorporação de variáveis de cunho social, ambiental, político e econômico.

No campo dos recursos hídricos, raramente o sistema analisado é totalmente fechado, portanto é importante considerar os impactos causados aos demais subsistemas e ao meio ambiente (Porto e Azevedo, 1997, p. 62).

Alguns aspectos que permeiam o ambiente decisório tornam a complexidade e a incerteza cada vez mais presentes na análise de sistemas de recursos hídricos, a saber:

- a necessidade de atingir diversos objetivos simultaneamente, muitos não apenas conflitantes como também não quantificáveis ou mensuráveis monetariamente;

- o envolvimento de atores sociais no processo decisório com interesses diversos; e
- a representatividade nos comitês de bacia e a legitimidade das decisões.

### 3.1.6.1 Metodologia multicritério de apoio à decisão (MCDA)

A metodologia multicritério para ser efetiva deve apresentar uma estrutura lógico-dedutiva que, partindo de alguns axiomas referentes ao comportamento na escolha individual, estabelece uma série de teoremas relativos que restringem o problema de agregar as preferências individuais na escolha.

#### *Objetivos*

A técnica multicritério possui os seguintes objetivos (Hobbs e Meier, 2000, p. 6-8):

- estruturar o processo de decisão;
- facilitar a negociação;
- documentar como as decisões são feitas; e
- informar aos agentes envolvidos as implicações e conseqüências dos atributos examinados, inspirando mais segurança na tomada de decisão.

#### *Implementação*

A absorção das variáveis intervenientes pela técnica multicritério é feita pela aproximação das curvas de indiferença (de mesma utilidade) com os decisores. Esse processo é visto graficamente na Figura 3.3 e na Figura 3.4, que mostram quais alternativas são igualmente preferidas.

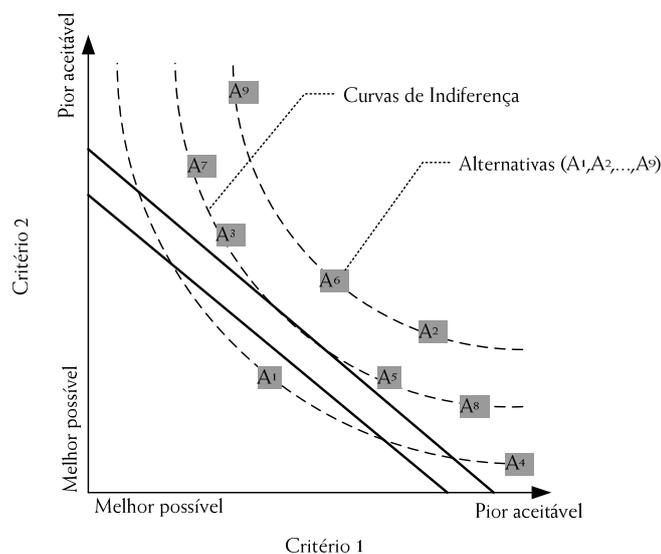


Figura 3.3 Curvas de indiferenças elaboradas com os decisores, adaptada de Hobbs e Meier (2000, p. 59).

A Figura 3.3 apresenta onde as várias alternativas viáveis se posicionam por meio dos critérios 1 e 2 dispostos nos eixos das abscissas e ordenadas, respectivamente, segundo uma escala que varia do melhor possível ao pior aceitável para os decisores. Demonstra a indiferença dos decisores diante das alternativas  $A_2$ ,  $A_6$  e  $A_9$ . A alternativa que maximiza os benefícios a todos os decisores é aquela disposta na curva de indiferença que tangencia a curva de restrição (Sica e Camargo, 2004d).

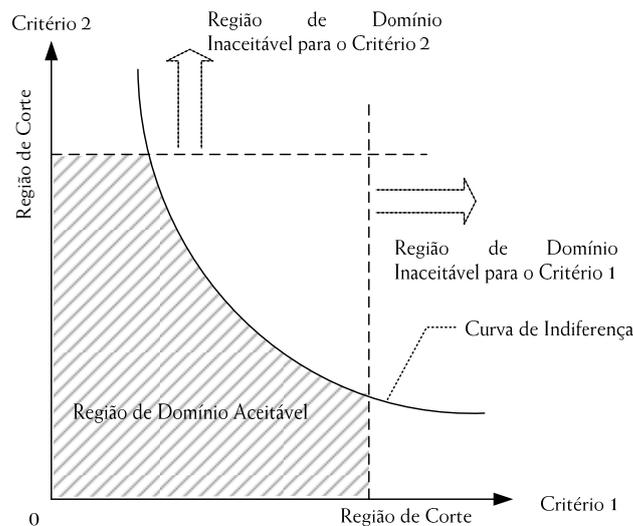


Figura 3.4 Análise de preferência, região de viabilidade dos critérios, adaptada de Hobbs e Meier (2000, p. 49)

Caso não seja possível identificar a alternativa "ótima", pode-se restringir as regiões inaceitáveis para cada critério, conforme a Figura 3.4, por meio de cortes definidos pelos decisores.

### Processo decisório

A decisão realiza-se, por meio de um processo, ao longo do tempo, e não sob um ponto determinado no tempo. Esse processo pode acontecer com muitos confrontos e interações entre as preferências dos atores (Ensslin *et al*, 2001). Dessa forma, o conjunto de etapas e os resultados que irão orientar a decisão a ser tomada não podem ser separados do processo de decisão.

Os atores podem ser distinguidos, segundo Ensslin *et al*, (2001, p. 18-19), em intervenientes e agidos. Os intervenientes são aqueles que, por ações intencionais, participam diretamente do processo decisório com o objetivo de nele fazer prevalecer os seus valores. Os agidos são aqueles que sofrem de forma passiva as conseqüências da decisão tomada,

podendo exercer pressão sobre os intervenientes e atuar de forma indireta no processo decisório.

Os atores intervenientes são classificados em decisores (aquele formalmente ou moralmente, que detém o poder de decisão), os representantes (aquele que é incumbido de representar o decisor no processo de apoio à decisão) e o facilitador (consultor). Nesse ponto existe a principal diferença em relação à pesquisa operacional, pois o facilitador também é considerado um ator e, portanto, jamais será neutro. A função do facilitador é apoiar o processo de tomada de decisão por meio de um modelo construído com tal finalidade (Sica, 2003, p. 52).

O problema decisório em recursos hídricos não visa encontrar somente o valor "ótimo" de uma única função de desempenho, mas, sim, otimizar o vetor de várias funções de desempenho. Diante disso, a metodologia multicritério de apoio à decisão é perfeitamente aplicável.

Destarte, faz uso do conceito formulado por Vilfredo Pareto (1848-1923), a saber: uma alternativa  $Y$  domina uma alternativa  $X$  se na passagem de  $Y$  para  $X$  existir melhoria de pelo menos uma das funções-desempenho e as restantes permanecerem inalteradas. Dessa forma, a alternativa  $X$  é denominada inferior e deve ser descartada.

Assim, cada uma das alternativas não inferiores é elegível ou ótima, segundo o conceito formulado por Pareto. Entretanto, o problema não está resolvido, pois, geralmente, existe mais de uma alternativa classificada como não inferior, por exemplo, as alternativas  $A_3$ ,  $A_7$  e  $A_8$  da Figura 3.3.

A solução será encontrada quando o decisor declarar suas preferências para cada objetivo que compõem o vetor da alternativa. Para tanto, a alternativa pode ser avaliada, por exemplo, pelo seu valor esperado, ou seja, pelo equacionamento em (3.24).

### *Estruturação do modelo*

O modelo multicritério possui uma estrutura arborescente (Figura 3.5) no qual são determinados os pontos de vista considerados como fundamentais pelos decisores. A estrutura é baseada na lógica de decomposição de um critério ( $c_{ij}$ ) complexo que pode ser decomposto em subcritérios de mais fácil mensuração, ou seja, o critério de nível hierárquico superior é definido pelos subcritérios de nível hierárquico inferior que estão conectados pela árvore.

Os critérios de nível hierárquico inferior devem possuir a propriedade de serem mutuamente exclusivos e o conjunto define por completo o nível hierárquico superior, ao qual estão conectados. Na Figura 3.5, o critério  $c_{1,2}$  é completamente definido e mensurável pelos subcritérios  $c_{1,2,1}$  e  $c_{1,2,2}$ .

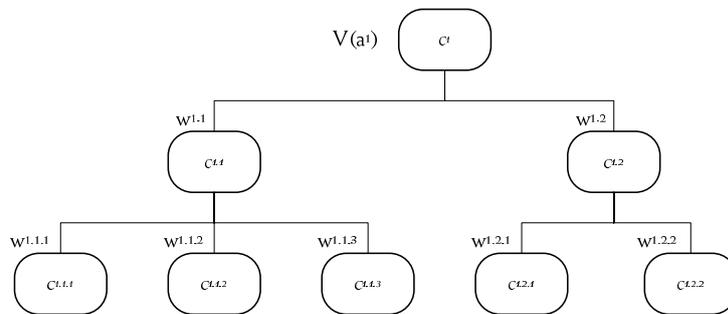


Figura 3.5 Estrutura do modelo multicritério (Sica, 2003, p. 69)

As relações de preferência estrita (na maximização) podem ser exemplificadas da seguinte forma: sejam quatro ações potências  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , e  $a_4$  e um critério  $f_i(c)$  que medem o grau de preferência. O objetivo é maximizar o valor do critério  $f_i(c)$ . Dessa forma, se  $a_1$  é preferível a  $a_2$  ( $a_1 P a_2$ ), então  $V(a_1) > V(a_2)$ . Essa relação é chamada de preferência estrita, e definida como  $a_1 P a_2 \Leftrightarrow V(a_1) > V(a_2)$ . Caso  $a_3$  seja indiferente a  $a_4$  ( $a_3 I a_4$ ), então se tem uma relação de indiferença definida como  $a_3 I a_4 \Leftrightarrow V(a_3) = V(a_4)$ .

Nas relações de preferência de minimização podem ser exemplificadas da seguinte forma: sejam quatro ações potências  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , e  $a_4$  e um critério  $f_i(c)$  que medem o grau de preferência. O objetivo é minimizar o valor do critério  $f_i(c)$ . Dessa forma, se  $a_1$  é preferível a  $a_2$  ( $a_1 P a_2$ ), então  $V(a_1) < V(a_2)$ . Essa relação é chamada de preferência estrita, e definida como  $a_1 P a_2 \Leftrightarrow V(a_1) < V(a_2)$ . Caso  $a_3$  seja indiferente a  $a_4$  ( $a_3 I a_4$ ), então se tem uma relação de indiferença definida como  $a_3 I a_4 \Leftrightarrow V(a_3) = V(a_4)$ . O mais comum neste tipo de função é a otimização do custo.

O enquadramento do processo decisório, segundo Keeney (1998), é formado pelo conjunto de ações potenciais associado aos Pontos de Vista Fundamentais (PVFs) dos decisores, os quais explicitam valores que os decisores consideram importantes naquele contexto (Sica e Camargo, 2004d).

Os decisores, diante de um cenário, alcançam seus objetivos estratégicos por meios definidos como PVFs que delimitam o conjunto de ações potenciais disponíveis.

Para construir um ponto de vista fundamental é necessário enquadrar o critério candidato, segundo Ensslin *et al*, (2001, p. 131-143), nas seguintes propriedades:

- ser essencial - é a necessidade do PVF em representar um aspecto que seja fundamentalmente importante segundo os objetivos estratégicos dos decisores;
- ser controlável - é a necessidade do PVF em representar um aspecto que seja influenciado apenas pelas ações potenciais em questão;
- ser completo - o conjunto de PVFs deve incluir todos os aspectos considerados como fundamentais pelos decisores;
- ser Mensurável - o PVF deve permitir, com a menor ambigüidade possível, especificar a performance das ações potenciais, de acordo com os aspectos considerados;
- ser operacional - o PVF deve possibilitar a coleta das informações requeridas sobre a performance das ações potenciais, dentro do tempo disponível e com um esforço viável;
- ser isolável - o PVF deve permitir a análise de um aspecto fundamental de forma independente em relação aos demais aspectos do conjunto;
- ser não-redundante - o conjunto de PVFs não deve avaliar o mesmo aspecto mais de uma vez;
- ser conciso – o número de aspectos considerados pelo conjunto de PVFs deve ser o mínimo necessário para modelar o problema de forma adequada; e
- ser compreensível - o PVF deve ter significado claro e objetivo, permitindo a geração e comunicação de idéias.

Quando o objetivo for construir uma função valor ou utilidade, é requerida apenas a independência preferencial mútua entre pares de PVFs. Um PVF é preferencialmente independente dos outros PVFs se a ordem e a intensidade de preferência entre um par de ações potenciais, no PVF considerado, não depender da performance das mesmas ações nos demais PVFs. Essa verificação proporciona duas conseqüências fundamentais, segundo Ensslin *et al*, (2001, p. 167). A primeira é a possibilidade de realizar uma avaliação local, ou seja, medir a performance de um determinado PVF, independente da performance dos outros

PVFs. A segunda é a factibilidade de realizar uma avaliação global, ou seja, determinar a performance global em todos os eixos de avaliação do modelo multicritério.

### *Descritores*

Para cada ponto de vista, é necessário um descritor e uma função utilidade associada ao descritor. Essa é uma etapa crucial, na qualidade do modelo multicritério, pois, a partir dos descritores, iniciar-se-á o processo para identificar oportunidades de aperfeiçoamento.

O descritor é constituído por níveis de impactos, em que cada nível de impacto é visto como a representação do desempenho da ação potencial no critério considerado. Os níveis de impacto são ordenados, em termos de preferência, de acordo com o sistema de valores dos decisores, e o nível mais atrativo corresponde a uma ação cuja performance é a melhor possível. De outra forma, o menos atrativo corresponde a uma ação cuja performance é a pior aceitável (Sica, 2003; Sica e Camargo, 2004d).

De acordo com o paradigma construtivista, não existe um descritor ótimo, mas um descritor que é adequado à medida que os decisores o considerem como uma ferramenta apropriada para avaliarem-se as ações potenciais.

Hobbs e Meier (2000), além de Ensslin *et al* (2001), afirmam que os descritores podem ser classificados em diretos (têm o formato de uma medida numérica intrínseca); construídos ou indiretos (associa uma propriedade fortemente relacionada); quantitativo ou qualitativo; contínuo (formado por uma função matemática contínua); ou discreto (formado por um número finito de níveis de impacto).

### *Propriedades*

- mensurabilidade - permite quantificar a performance de uma ação de forma clara;
- operacionalidade - define claramente como e quais dados coletar; e
- compreensibilidade - permite a descrição e interpretação da performance da ação potencial de forma não ambígua.

### *Taxas de substituição (trade-offs)*

As taxas de substituição de um modelo multicritério representam a perda de desempenho que uma ação potencial deve sofrer sobre um critério para compensar o ganho de desempenho em outro. A necessidade dessas taxas é revelada na avaliação local e global das ações potenciais.

### *Avaliação do modelo*

A avaliação global é requisitada apenas quando uma alternativa dominante não for suficiente para auxiliar a decisão (Sica, 2003). Nesse caso, a avaliação é feita por meio da Equação (3.22) ou da Equação (3.23).

#### **3.1.6.2 Método da pontuação direta**

Para a utilização desse método, deve-se obter, previamente, um descritor (qualitativo ou quantitativo). O descritor é formado por um conjunto de níveis de impacto, ordenados preferencialmente, estando definidos o pior e o melhor nível. A esses dois níveis (melhor e pior) são associados valores que servirão de base para a escala de preferência. Em seguida, os decisores são questionados a expressar numericamente a atratividade dos demais níveis em relação aos valores auferidos como melhor possível e pior aceitável. Os valores intermediários são definidos por compensação (Ensslin *et al.*, 2001; Sica, 2003).

#### *Vantagens*

- a rapidez na obtenção da função de valor;
- a simplicidade do procedimento; e
- a ausência de transformações matemáticas que possam afetar a credibilidade dos resultados obtidos.

#### *Desvantagem*

- exigir dos decisores que expressem suas preferências numericamente podendo gerar funções valor que estejam em desacordo com suas preferências.

#### *Implementação*

A implementação computacional é trivial, porém requer uma interface amigável (interpretativa) com o operador.

#### **3.1.6.3 Método da Bisseccção**

É especialmente útil quando os descritores são quantitativos contínuos. Nesse caso, é preciso que um índice numérico (descritor) já esteja previamente construído e os níveis de impacto pior e melhor definidos. A esses dois níveis (melhor e pior) são associados valores que servirão de base para a escala. Em seguida, pede-se aos decisores para identificar uma

ação potencial fictícia que possua, segundo esse índice, um desempenho cujo valor esteja na metade dos dois valores extremos (melhor e pior). Por meio de subdivisões adicionais, pode-se refinar a função valor e/ou associar uma função distribuição de probabilidade (Ensslin *et al*, 2001; Sica, 2003).

#### *Vantagem*

- não requer transformações matemáticas e os pontos são obtidos de forma direta.

#### *Desvantagens*

- exigir que os decisores expressem suas preferências matematicamente;
- requer um descritor quantitativo contínuo; e
- ter um procedimento de questionamento que exige um grande nível de abstração dos decisores.

#### *Implementação*

A implementação computacional é trivial, porém requer uma interface amigável (interpretativa) como o operador.

### 3.1.6.4 Método MACBETH

A abordagem MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) é uma técnica de apoio à construção de escalas numéricas de intervalos baseada na elaboração de julgamentos semânticos de diferença de atratividade entre duas ações.

A função valor é obtida por meio de comparações, par a par, da diferença de atratividade entre ações potenciais. Tais comparações são feitas solicitando que os decisores expressem qualitativamente, por uma escala ordinal semântica (Tabela 3.1), a intensidade de preferência de uma ação sobre a outra.

*Tabela 3.1 Escala comparativa de julgamento semântico para o método MACBETH*

$v(p, q)$	Julgamento Semântico
C0	nenhuma diferença de atratividade
C1	diferença de atratividade muito fraca
C2	diferença de atratividade fraca
C3	diferença de atratividade moderada
C4	diferença de atratividade forte
C5	diferença de atratividade muito forte
C6	diferença de atratividade extrema

O MACBETH utiliza os julgamentos semânticos dos decisores para, por modelos de Programação Linear, determinar a função valor que melhor represente tais julgamentos (Bana e Costa e Vasnick, 1995).

Para usar esse método, constrói-se uma matriz de julgamento semântico, verificando-se a diferença de atratividade que o decisor percebe entre os níveis de impacto do descritor. Essa matriz fornece os dados de entrada no *software* MACBETH que, ao ser executado, gera uma escala. Tal escala procura determinar uma função valor que respeite os julgamentos semânticos preferidos pelo decisor.

#### *Vantagem*

- os decisores expressam suas preferências entre pares de ações de forma qualitativa.

#### *Desvantagens*

- o método requer transformações matemáticas, a partir do julgamento dos decisores, ou seja, os pontos são obtidos de forma indireta;
- por vezes, não existe nenhuma função valor compatível com a matriz de julgamentos fornecida pelos decisores; e
- o processo de questionamento pode-se tornar tedioso, em virtude da elevada quantidade exigida de comparações.

### **3.1.6.5 Método AHP**

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP), apresentado por Saaty (1980) tem como um dos objetivos representar os modelos de modo mais realista, incluindo todas as medidas importantes tangíveis ou intangíveis, fatores quantitativamente mensuráveis ou qualitativos.

A ordenação hierárquica é um tipo de estrutura hábil para fornecer uma visão global do problema e da relação de complexidade, que ajuda o decisor na avaliação da dimensão e do conteúdo dos critérios, pela comparação homogênea dos elementos. Como consequência, o processo se reduz a uma seqüência de comparações, par a par, desses componentes identificados.

A estrutura hierárquica desenvolve-se linearmente ou não, do nível mais elevado até ao nível inferior, dos conceitos e das características gerais para os princípios básicos e concretos.

O método AHP usa comparações por pares entre as alternativas, entre os critérios, objetivando-se determinar as prioridades das alternativas ao longo da hierarquia, normalmente de baixo para cima nela. Após a construção da hierarquia, cada agente de decisão fará a comparação, par a par, de cada elemento de um dado nível hierárquico, criando-se uma matriz de concordância,

$$\begin{bmatrix}
 v_{1,1} & v_{1,2} & \dots & v_{1,q} \\
 v_{2,1} & v_{2,2} & \dots & \\
 v_{3,1} & v_{3,2} & \dots & \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\
 & & & \dots & & \\
 v_{p,1} & v_{p,2} & \dots & v_{p,q}
 \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

recíproca positiva, em que ele representará, a partir de uma escala predefinida (Tabela 3.2), sua opinião/preferência dentre os elementos, comparados entre si (Saaty, 1980).

Tabela 3.2 Escala comparativa de julgamento semântico para o método AHP

$v(p, q)$	Julgamento Semântico
1	Igualmente preferido (indiferente)
3	Preferência Fraca de $p$ sobre $q$
5	Preferência Moderada de $p$ sobre $q$
7	Preferência Forte de $p$ sobre $q$
9	Preferência Absoluta de $p$ sobre $q$

em que

$$v_{p,q} = \frac{1}{v_{q,p}} \tag{3.36}$$

Saaty (1980) determina a importância relativa entre as alternativas avaliadas, neste caso os usos múltiplos numa bacia hidrográfica, segundo o autovetor. Porém, sugere que antes se calcule a consistência do julgamento disposto na matriz de concordância da seguinte forma:

$$\begin{cases}
 \frac{\lambda^{max} - n}{n - 1} \leq 1 \rightarrow \text{consistente} \\
 \frac{\lambda^{max} - n}{n - 1} > 1 \rightarrow \text{inconsistente}
 \end{cases} \tag{3.37}$$

em que  $\lambda^{max}$  é o maior autovalor e  $n$  é a dimensão da matriz.

### Vantagens

- os pontos são obtidos de forma direta, e

- a mente humana tem muitas dificuldades em comparar simultaneamente diversas alternativas.

### *Desvantagens*

- a comparação aos pares pode provocar inconsistências; e
- a obtenção indireta da importância relativa pode revelar um comportamento indesejado do modelo para o decisor.

### *Implementação*

AHP Multiplicativo - Converte as preferências de escala verbal para numérica, mas ao contrário do método AHP que utiliza uma escala linear este utiliza uma escala geométrica.

AHP-BG - Uma das variações do AHP que procura eliminar um problema do AHP original quanto a reversão de ordem que se verificava quando na inclusão de nova alternativa.

EXPERT CHOICE – Efetua análises de inconsistências, por meio de matrizes recíprocas, nos julgamentos do usuário – *software* utilizado em empresas.

### **3.1.6.6 Método Electre**

O método Electre (*Elimination and Choice Translating Reality*), demonstrado por Bernard Roy e Figueira (2005), aplica-se no tratamento de alternativas discretas avaliadas qualitativamente. As alternativas são comparadas por meio do estabelecimento de uma relação de preferência. O índice de concordância é uma porcentagem ponderada dos critérios para os quais a alternativa  $i$  é preferida à alternativa  $j$  - esses índices são dispostos em uma matriz de concordância.

ELECTRE I – efetua a construção de matrizes de concordância e de discordância por meio de critérios de peso e das diferenças entre cada par de valores das alternativas. É designado para problemas de escolha. A eliminação é seqüencial.

ELECTRE II – efetua a hierarquização de alternativas da “melhor” para a “pior”, por meio da lógica Fuzzy. Utiliza critérios de pesos.

ELECTRE III – efetua comparações com pseudocritérios por meio de lógica Fuzzy; utiliza critério de pesos. Três aspectos são considerados: de aceitação, de rejeição e/ou estimando a credibilidade da informação.

ELECTRE IV – efetua a hierarquização considerando uma família de pseudocritérios, porém sem introduzir qualquer critério de pesos.

ELECTRE IS – baseado no ELECTRE I. No entanto, é capaz de usar pseudocritérios (critério com limitações), pressupondo uma série finita de alternativas avaliáveis sobre uma família de critérios.

#### *Vantagens*

- o método é aplicado eficazmente em várias situações práticas, em virtude principalmente da legitimidade dos “pesos” em relação ao decisor; e
- a análise de sensibilidade é factível.

#### *Desvantagem*

- os índices de concordância podem ser quantidades consideradas “obscuras” pelo decisor, caso não as compreenda.

### **3.1.6.7 Método Promethee**

O método Promethee (*Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*), demonstrado por Brans e Mareschal (2005), estabelece uma estrutura de preferência entre alternativas discretas. A estrutura de preferência é definida por comparações par a par. Para cada critério de avaliação, pode ser definida uma função de preferência distinta compreendida entre 0 (indiferença) e 1 (preferência total). A classificação das alternativas é obtida por meio de um índice de preferência global – determinada por pesos associados para cada critério.

PROMETHEE I – ordena parcialmente as alternativas por meio de dois fluxos de hierarquização: um positivo que mostra como a alternativa  $m$  se sobressai sobre as outras, e um outro negativo, mostra como a alternativa  $m$  é sobrepujada por outras. É semelhante ao índice de concordância do método ELECTRE III.

PROMETHEE II - hierarquiza as ações, numa ordem decrescente, no entanto generaliza o conceito de qualificação. Não há “incomparabilidades” (Rosinger, 1985). Pré-ordenação completa única.

PROMETHEE III – considera intervalos e não fluxos para enfatizar a regra de indiferença na hierarquização; fornece uma pré-ordenação de intervalos sobre uma série finita de ações.

PROMETHEE IV – efetua a escolha por uma série infinita de ações, por meio das mesmas relações de hierarquização que o PROMETHEE III, mas os fluxos são definidos sobre uma subsérie compacta de  $\mathbb{R}^n$ .

PROMETHEE V - permite incorporar restrições para as alternativas. O problema é diferente: várias alternativas têm que ser selecionadas segundo uma restrição verificada entre a quantidade existente. Após a hierarquização, alguns critérios são otimizados somente para as melhores alternativas.

#### *Vantagem*

- a possibilidade do exercício de diversas funções de preferência; e
- o método é aplicado eficazmente em várias situações práticas, em virtude, principalmente, da legitimidade dos “pesos” em relação ao decisor.

#### *Desvantagem*

- a análise de sensibilidade deixa a desejar em virtude da possibilidade de existência de diversas funções de preferência para cada critério.

### **3.1.6.8 Método da função utilidade multidimensional**

A função utilidade, apresentada por Keeney e Raiffa (1976) e Dyer (2005), é a representação matemática da estrutura de preferência do decisor e incorpora a maneira de agir do decisor em situações de incerteza. A função utilidade é representada por uma variável normalizada, na qual o valor zero é associado à pior consequência aceitável,  $A_*$ , e o valor um à melhor consequência possível,  $A^*$ . Entretanto, existem certas condições a serem satisfeitas para representar as preferências do decisor sob a forma de função utilidade. Essas condições são axiomas do comportamento racional, que implicam comportamento consistente do decisor na escolha entre alternativas com diferentes probabilidades de ocorrência.

#### *Vantagem*

- a possibilidade de avaliação explícita das alternativas por meio de funções utilidades; e
- a robustez matemática do método.

#### *Desvantagem*

- a rigidez das suposições psicológicas envolvidas; e
- a falta de procedimento eficiente para analisar a sensibilidade das soluções alcançadas.

### *Implementação*

Esse método assume o axioma da preexistência de um sistema completo de preferências, transitividade e independência das preferências do decisor, ou seja, assume completamente os axiomas da Teoria da Utilidade. Para tanto, três passos são necessários: (i) examinar a estrutura qualitativa das preferências do decisor; (ii) determinar uma função de utilidade marginal; e (iii) determinar os coeficientes de escala. Isso foi aplicado, por exemplo, no Método do Peso Médio (*Weighted Average*) - valores numéricos são desenvolvidos para cada critério  $i$  e alternativa  $j$ ; são assumidos pesos e uma função de utilidade linear para cada critério. E, no método ARIADNE (*Alternative Ranking Interactive Aid based on DomiNance structural information Elicitation*) - formas de utilidade aditiva e Programação Linear são utilizadas para considerar todos os valores e pesos, na hierarquização de atributos, para chegar a uma estrutura de dominância.

### **3.1.7 Aplicações**

O planejamento de recursos hídricos passa por transformações institucionais e por reformulações de seus procedimentos de gestão e de avaliação do desempenho. As avaliações das alternativas de planejamento de recursos hídricos, contemplando múltiplos objetivos, em especial, os sociais e os ambientais, foram abordadas por Braga (1979).

Nessa abordagem, Braga propõe a decomposição de objetivos sociais (como o aumento da qualidade de vida dos usuários das águas de um reservatório), a fim de considerar múltiplos critérios sob incerteza<sup>31</sup>. A decomposição foi efetuada por meio de atributos, mensurando indiretamente o objetivo. Para tanto, Braga elaborou uma estrutura hierárquica do problema no qual cada atributo é uma medida individual do objetivo. A decomposição, na área de planejamento, foi efetuada à luz dos trabalhos de Kenney e Raiffa (1976).

Do mesmo modo, Zuffo (1998) propôs a inserção das variáveis ambientais e sociais, além das técnicas e econômicas, no planejamento de recursos hídricos. Para tanto, aplicou a metodologia multicritério, por meio de cinco técnicas – ELECTRE II, PROMETHEE II,



<sup>31</sup> A análise da incerteza, em sistemas hídricos, é uma questão complexa. Os trabalhos organizados por Kundzewicz (1995) abordam procedimentos e metodologias para o tratamento da incerteza, tendo como fundamento a Teoria da Dinâmica de Sistemas.

Programação por Compromisso, Teoria de Jogos e o AHP -, em quatro cenários possíveis e nove alternativas viáveis, sendo cada alternativa com vinte critérios valorados.

O *trade-off* dos critérios foi obtido por *survey* e o modelo multicritério construído foi aplicado na bacia hidrográfica do Rio Cotia (São Paulo). Os resultados demonstram a factibilidade da metodologia multicritério para internalização de aspectos qualitativos e para avaliação dos cenários e das alternativas de planejamento.

Oliveira (2003) optou, também, ponderar o *trade-off* de cada critério por um *survey* realizado com especialistas. No entanto, o modelo multicritério foi implementado por meio da lógica *fuzzy*. Esse modelo foi aplicado na avaliação de fatores poluentes do Rio Cuiabá. Os critérios adotados foram os efluentes domésticos e industriais, além da sazonalidade e da poluição oriunda de fonte difusa.

Jardim (1999) comparou quatro técnicas de análise multicritério como meio de apoio à decisão nos comitês. As técnicas ELECTRE I e II, Programação por Compromisso e AHP foram aplicadas no estudo de caso sobre o Comitê de Bacia do Rio Gravataí. Os objetivos foram o enquadramento e a hierarquização das ações de intervenção e a classificação das alternativas de solução para o desenvolvimento sustentado da bacia. As técnicas multicritério foram aplicadas para vinte e sete alternativas de solução sob quinze critérios, e três estratégias básicas: equidade social, preservação ambiental e crescimento econômico. Entretanto, essa abordagem não incluiu os aspectos de variabilidade dos fenômenos hidrológicos e tampouco a complexa interação entre os sistemas sociais, econômicos e ambientais.

Outras experiências relevantes e aplicações práticas da metodologia multicritério são citadas por Jardim (1999, p. 40):

- Braga e Rocha (1988) - localização do Pólo Petroquímico do Rio de Janeiro;
- Singer e Harris (1989) - determinação de sítios potenciais para aproveitamentos hidrelétricos reversíveis no estado de São Paulo;
- Goicoechea *et al* (1992) - avaliação experimental de modelos de análise multicritério no planejamento de recursos hídricos em *Washington-DC*; e
- Teixeira e Barbosa (1995) - avaliação multicritério de alternativas de projeto de barragens de uso múltiplo.

Do mesmo modo, os modelos multicritério foram aplicados com grande aceitabilidade entre os grupos sociais afetados na bacia do Rio *Svarta* (Suécia), onde foram utilizados para as licenças de uso da água, considerando os usos múltiplos. Igualmente, no *Manayunk Canal* (EUA), onde duas indústrias e a comunidade local, que defendia o uso para recreação, competiam pela água (Mauad e Lima, 2003, p. 103-4), no planejamento de sistemas de energia das empresas *Seattle City Light*, *BC Hydro* e *BC Gás* (Hobbs e Méier, 2000, p. 159-234).

Outrossim, a metodologia multicritério de apoio à decisão (MCDA) foi aplicada por Jardim (2003) no ambiente do comitê de uma bacia hidrográfica. O objetivo foi apresentar um modelo constituído por meio de uma sistemática de estruturação de problemas complexos, considerando:

- a experiência dos decisores; e
- a representação dos valores, das crenças e das culturas dos atores sociais afetados.

O modelo desenvolvido aborda a cobrança pelo uso da água, na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria (RS), e foi baseado em mapas de relação meios-fim agregados dos decisores. Os objetivos fundamentais relativos ao problema da cobrança foram estruturados e hierarquizados. A modelagem multicritério, com base no ótimo de Pareto, mostrou-se exequível no âmbito dos comitês.

Avogrado e Minciardi (1996 *apud* Christofolletti, 1999, p. 167) desenvolveram um modelo decisório que considerou a bacia como unidade de planejamento. O objeto de estudo foi a região do norte da Itália, onde as águas para o abastecimento urbano e geração de energia elétrica são represadas. O foco principal é a qualidade das águas, conquanto considerou as demandas dos diversos agentes econômicos e o fluxo mínimo para o canal fluvial (Christofolletti, 1999, p. 167).

Já, a Universidade de Tecnologia de *Delft* desenvolveu um sistema de suporte à decisão, cuja finalidade foi estabelecer procedimentos para otimizar o uso dos recursos relacionados com as águas. Destarte, Verhaeghe e Krogt (1996 *apud* Christofolletti, 1999, p. 167-9) listaram os principais componentes e as inter-relações que devem ser consideradas para modelagem de recursos hídricos, a saber:

- os cenários econômicos e demográficos – a fim de projetar as atividades econômicas;
- o planejamento espacial – a magnitude e o entrosamento das atividades usuárias;

- a projeção das atividades que fazem uso das águas – o planejamento envolve a disponibilidade hídrica da bacia e as demandas previstas para os usuários, as quais, por sua vez, são afetadas pelas projeções socioeconômicas e pelo desenvolvimento regional;
- os dados hidrometeorológicos – a fim de estabelecer a disponibilidade hídrica e a sua variabilidade espacial e temporal ao longo da bacia; e
- a simulação – alocação e distribuição das águas por meio do balanço hídrico.

As relações de troca (*trade-offs*) entre os agentes usuários, respeitando os usos múltiplos na operação de reservatórios, foram tratadas por Brandão (2004). O modelo desenvolvido é baseado na programação não-linear sob o enfoque de duas técnicas de otimização: por restrições e por pesos. O objetivo foi analisar a operação e o desempenho dos sistemas de reservatórios segundo a ótica dos usos múltiplos. No método das restrições, considera-se apenas um uso na função-objetivo, e os demais usos são restrições. No método dos pesos os usos são incluídos na função-objetivo, e cada um é ponderado de acordo com uma relação de prioridade de atendimento.

No estudo de caso analisado, com três cenários hidrológicos e extensão de seis anos, foi apresentado o *trade-off* entre irrigação e geração de energia elétrica na bacia do Rio São Francisco. Os resultados indicam que o método das restrições explicita claramente o *trade-off* entre os usos competitivos. O método dos pesos, por sua vez, analisa um número maior de usos, porém é necessário estabelecerem-se os coeficientes de ponderação.

Já, o trabalho elaborado por Roberto (2002) abrangeu três metodologias de auxílio à decisão em problemas de alocação de água: a programação linear, a programação dinâmica e os modelos de simulação. O estudo desenvolvido foi aplicado no sistema Alto Tietê composto de cinco reservatórios situados a montante da cidade de São Paulo. Os resultados obtidos demonstram que as demandas prioritárias (irrigação, abastecimento público e vazão mínima defluente) são atendidas nas três metodologias aplicadas.

Por fim, ressalta-se que os métodos/técnicas multicritério/multiobjetivo que focam especialmente o problema de como atribuir a importância (julgamento de valor) a um critério, normalmente, estão dissociados das técnicas/métodos que avaliam as conseqüências (propagação temporal) desta importância no desempenho do critério. Nesse sentido, propõem-se uso conjugado da Dinâmica de Sistemas, que possui um ambiente computacional

para problemas não-estruturados ou parcialmente estruturados<sup>32</sup> e proporciona a modelagem que critérios qualitativos e quantitativos.

## 3.2 Dinâmica de sistemas

A teoria geral dos sistemas, desenvolvida por Bertalanffy<sup>33</sup> (2004), pressupõe que os organismos são constituídos por elementos em constante interação, formando um sistema aberto em equilíbrio dinâmico e trocando tanto matéria quanto energia. A passagem de teoria geral para metodologia de análise de sistemas se deve a Jay W. Forrester, que, em 1961, publicou o livro intitulado "*Industrial Dynamics*". Em 1968, Forrester consolidou a teoria de Bertalanffy, como metodologia - ao alinhar seus princípios fundamentais junto a uma linguagem simbólica para o tratamento de equações diferenciais -, com a publicação do livro "*Principles of Systems*".

No entanto, foi apenas em 1970 e nos dois anos seguintes, que a Dinâmica de Sistemas eclodiu cientificamente. Nesse ano, Forrester foi convidado pelo Clube de Roma<sup>34</sup> para compor uma equipe de pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), chefiada por Denis L. Meadows, sua função seria corroborar a concepção de um modelo matemático, com o objetivo de analisar o crescimento econômico e o uso dos recursos naturais, em escala mundial. Dessa forma, Forrester apresentou três versões do modelo *World* - *World1*, *World2* e *World3* (Forrester, 1973) – resultando em simulações que deram origem ao relatório Meadows<sup>35</sup>, publicado, em 1972, com o título "*The Limits to Growth*" (Meadows et al, 1972).



<sup>32</sup> Uma das características dos métodos multicritério é possibilidade de modelar problemas não-estruturados ou parcialmente estruturados, ou seja, problemas que não possuem um algoritmo definido.

<sup>33</sup> Ludwig Von Bertalanffy foi um biólogo austríaco autor da "Teoria Geral dos Sistemas" - publicada em 1969 - e reconhecido como um dos teóricos pioneiros dos sistemas. Ele propôs "uma teoria de princípios universais aplicáveis aos sistemas em geral" (Bertalanffy, 2004), por meio do conhecimento interdisciplinar e transdisciplinar.

<sup>34</sup> Fundado, em 1968, por Aurelio Peccei e Alexander King, o Clube de Roma reuniu várias pessoas ilustres – de cientistas a políticos –, com o intuito de analisar a situação mundial e apresentar previsões e soluções para o futuro.

<sup>35</sup> Este relatório aborda problemas cruciais para o futuro desenvolvimento da humanidade, tais como energia, poluição, meio ambiente, crescimento econômico, crescimento populacional, uso dos recursos naturais, dentre outros, e conclui que o planeta não suportaria mais o crescimento populacional, devido à pressão sobre os recursos naturais e energéticos, considerando-se o avanço da tecnologia.

Para implementar o modelo, Forrester baseou-se na estrutura da matemática clássica, haja vista que “os sistemas podem ser definidos por famílias de equações diferenciais simultâneas” (Bertalanffy, 2004, p. 97). Dessa forma, ele aplicou a Dinâmica de Sistemas para simular sistemas complexos não-lineares, por meio de equações diferenciais, contendo laços de realimentações (*feedback loops*) (Figura 3.6).

A realimentação (*feedback loop*) calca-se no pressuposto de que as decisões são baseadas em informações advindas do sistema modelado. As decisões, por sua vez, resultam em ações que alteram o comportamento do sistema, produzindo novas informações e, assim, sucessivamente. A execução do modelo consiste na simulação de variáveis endógenas. Dessa forma, por meio da Dinâmica de Sistemas, é possível averiguar comportamentos que resultam do próprio sistema modelado.

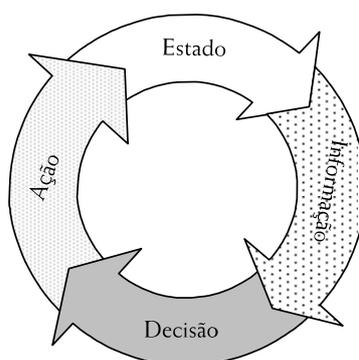


Figura 3.6 Ciclo de realimentação (*feedback loops*)

A Dinâmica de Sistemas não objetiva apenas determinar valores dos elementos que compõem o sistema, mas, sobretudo, o seu comportamento dinâmico. De acordo com as características dos elementos do sistema são definidas as variáveis de estado, que representam as condições do sistema, ao longo do tempo.

A interação ou a relação entre os elementos que compõem o sistema é o aspecto central que indica a sua existência, distinguindo-o de um aglomerado. As oscilações, nos modelos, não são regulares, pelo fato de envolverem muitas interações entre os elementos numa cadeia causal pautada em equações diferenciais não-lineares.

Há a possibilidade de mapearem-se estruturas organizacionais e sociais na mesma plataforma de simulação; dessa maneira, monitora-se a inter-relação entre fluxos de

informação e de matéria. Para tanto, é necessário, inicialmente, relacionarem-se os elementos que integraram o modelo por meio de um mapa causal, composto por laços causais<sup>36</sup> positivos (R) e negativos (B), que, por sua vez, são constituídos por ligações causais<sup>37</sup> positivas (S) e negativas (O) entre os elementos (Figura 3.7).

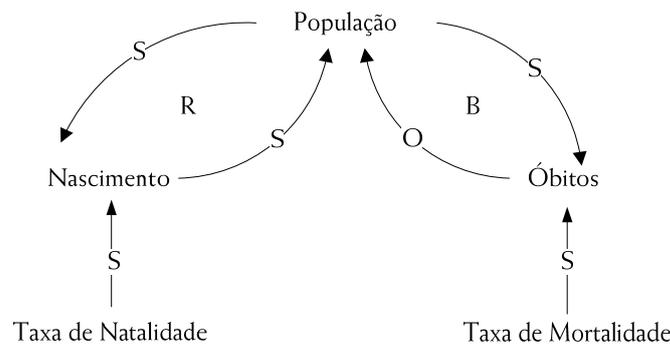


Figura 3.7 Diagrama de laços causais

Após relacionarem-se os elementos, é necessário identificar as variáveis de estado, taxa ou constante, por meio dos diagramas de fluxo, assim como a qualidade do fluxo: de informação ou físico (Figura 3.8).

- a variável de nível ou estado do sistema é identificada por um retângulo – utilizado para representar o acúmulo de uma determinada informação no tempo e/ou entender o seu comportamento no tempo;
- a variável de taxa ou auxiliar é identificada por um círculo – utilizada para representar informações dinâmicas de controle;
- a constante ou o parâmetro é identificada por um losango - são informações do sistema acessíveis durante o processo de simulação e observáveis;
- a informação exterior à delimitação do modelo de simulação é identificada por uma nuvem; e



<sup>36</sup> A Dinâmica de Sistemas é caracterizada pela realimentação, ou seja, a representação de relações de causa-efeito circular. O laço causal é composto de uma polaridade. Supondo que o laço causal esteja em equilíbrio, ao provocar uma perturbação positiva em um dos elementos observa-se o efeito nos elementos em seqüência, então, caso a perturbação gere um reforço tem-se um laço positivo, caso contrário será negativo. Em linhas gerais, caso o número de ligações causais negativas for par ou zero tem-se um laço de polaridade positiva, caso contrário o laço é de polaridade negativa.

<sup>37</sup> Relação de causa-efeito da influência de um elemento sobre o outro. Supondo dois elementos,  $x$  e  $y$ , a ligação causal pode ser positiva se o aumento (a diminuição) em  $x$  causar aumento (diminuição) em  $y$  e pode ser negativa se o aumento (a diminuição) em  $x$  causar diminuição (aumento) em  $y$ .

- o fluxo é identificado por uma linha cheia com uma seta apontando a direção que a informação percorre, já a linha tracejada se refere ao parâmetro de inicialização – representa o registro de controle da entrada e da saída do estado.

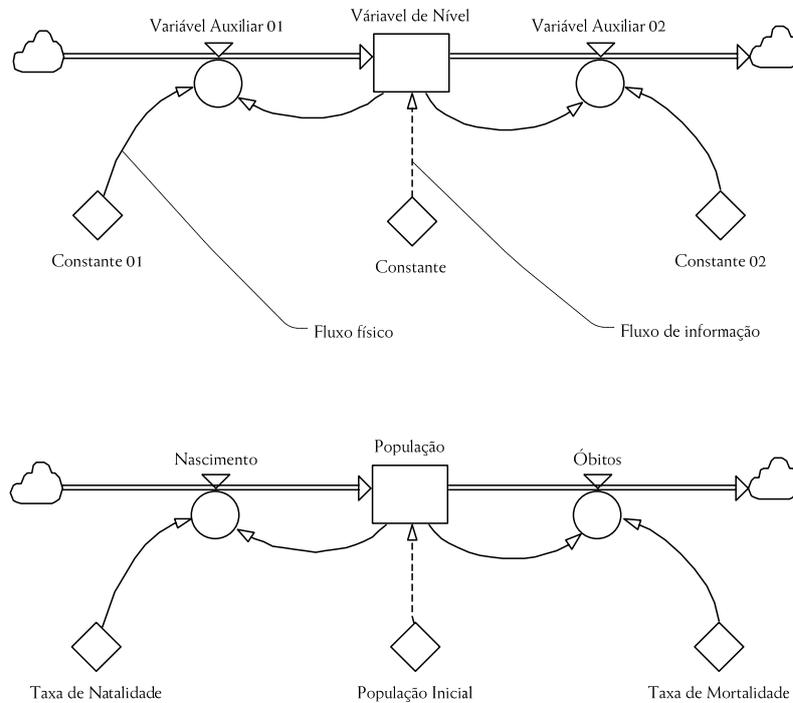


Figura 3.8 Simbologia de diagramas de fluxo (Forrester, 1968)

O processo de simulação depende do meio de integração numérica utilizado em equações diferenciais. Diante disso, é crucial o conhecimento do método de integração numérica utilizado pelo *software* de simulação, pois diferentes métodos podem acarretar diferentes valores de estado e resposta do sistema. Os métodos usados pelo *software* de simulação são de Euler e de Runge-Kutta de segunda à quarta ordem.

Para exemplificar, suponha o problema de valor inicial

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \tag{3.38}$$

O método de Euler<sup>38</sup> consiste na aproximação da solução por meio de tangentes, conforme Figura 3.9:

38

Leonhard Euler (1707-1783) nasceu, na Basileia, e morreu em São Petersburgo, em 1783, quando trabalhava na corte da imperatriz russa Catarina, a Grande. Um homem de memória fantástica e de grande poder de concentração, foi teólogo, físico, astrônomo, mas, principalmente, matemático. Fez contribuições para álgebra, trigonometria, geometria analítica, cálculo, equações diferenciais, teoria dos números e topologia, introduziu as notações, tais como  $e$ ,  $\pi$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $f(x)$ ,  $\sum x_i$ ,  $\text{sen } x$  e  $\text{cos } x$  (Boyer, 1996, p. 303-21).

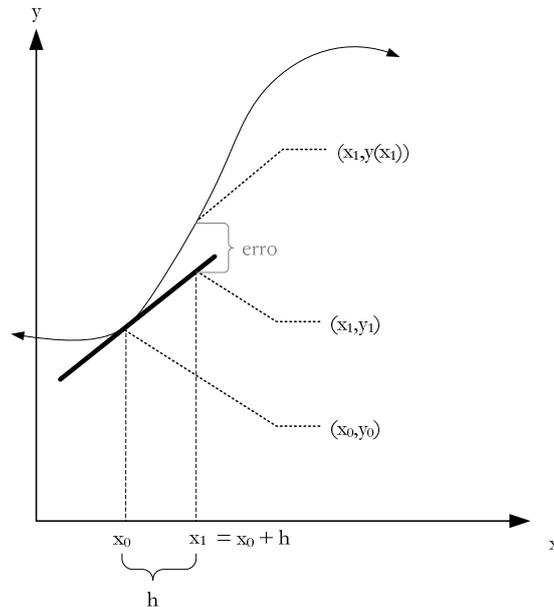


Figura 3.9 Método de Euler

Além do erro inerente ao método, o passo de simulação,  $h$ , pode acarretar discrepâncias. Portanto, quanto menor o passo de simulação melhor será a aproximação, porém maior o tempo de simulação. De modo geral, tem-se o equacionamento da solução por

$$y_{n+1} = y_n + hy'_n \rightarrow y_n + hf(x_n, y_n) \quad (3.39)$$

O método Runge-Kutta<sup>39</sup> é um dos métodos mais precisos para obter soluções aproximadas. A intenção é obter a precisão do método de Taylor<sup>40</sup>

$$y(x) = y(a) + y'(a)\frac{(x-a)}{1!} + y''(a)\frac{(x-a)^2}{2!} + \dots \quad (3.40)$$

sem calcular derivadas de ordem superior. Reescrevendo a série, sendo  $a = x_n$  e  $x = x_n + h$ , tem-se

$$y(x_n + h) = y(x_n) + y'(x_n)h + y''(x_n)\frac{h^2}{2} + \dots \quad (3.41)$$



<sup>39</sup> Carl D. T. Runge (1856-1927), professor alemão de matemática, que elaborou esse método numérico, em 1895, e Martin W. Kutta (1867-1944), também matemático alemão, aperfeiçoou-o em 1901 (Zill e Cullen, 2001, pp. 97-121)

<sup>40</sup> Brook Taylor (1683-1731), graduado em Cambridge, admirador de Newton e secretário da *Royal Society*, escreveu dois livros, porém seu nome é lembrado apenas pela série publicada, em 1715, no livro *Methodus incrementorum* (Boyer, 1996, p. 296).

Desse modo, a fórmula de Runge-Kutta de quarta ordem consiste em determinar constantes apropriadas, tais que

$$y_{n+1} = y_n + ak_1 + bk_2 + ck_3 + dk_4 \quad (3.42)$$

concorde com o desenvolvimento de Taylor até  $b^4$ . Portanto, tem-se

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 &= hf(x_n, y_n) \\ k_2 &= hf\left(x_n + \frac{1}{2}b, y_n + \frac{1}{2}k_1\right) \\ k_3 &= hf\left(x_n + \frac{1}{2}b, y_n + \frac{1}{2}k_2\right) \\ k_4 &= hf(x_n + b, y_n + k_3) \end{aligned} \quad (3.43)$$

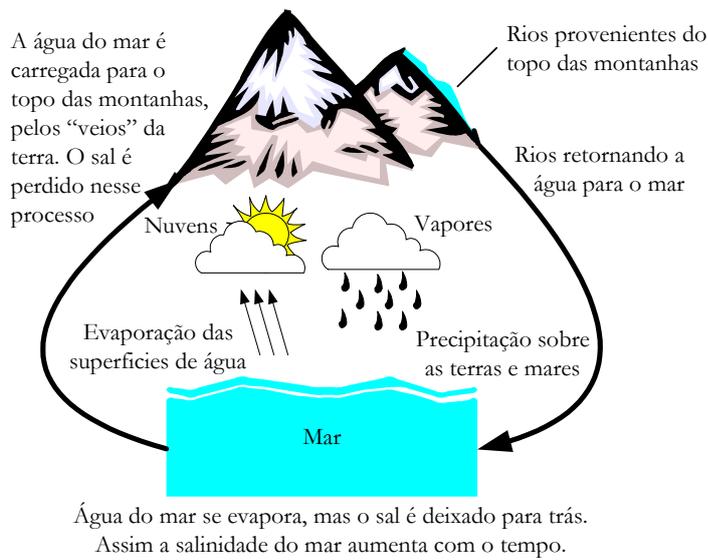
O *software* possibilita a simulação por esses métodos, sendo que dentre o de Euler, que pode ser considerado como Runge-Kutta de primeira ordem, e os de Runge-Kutta de segunda à quarta ordem, o que oferece maior precisão é o método de Runge-Kutta de quarta ordem (Zill e Cullen, 2001, p. 104-21).

### 3.2.1 Modelagem de sistemas complexos

Há uma grande diversidade de modelos para representação dos fluxos hídricos, desde a escala global à microrregional. A preocupação e o interesse pelos recursos hídricos permeiam as civilizações através dos tempos. Os recursos hídricos estão entre as razões do nascimento, da ascensão e do declínio de diversas civilizações. Um exemplo dessa preocupação remonta para um dos primeiros modelos representando o ciclo hidrológico, confeccionado por Leonardo da Vinci (Figura 3.10).

*Modelo é uma estrutura simplificada da realidade que supostamente, apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos [...] por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade (Hagget e Chorley, 1975, p. 8).*

Nesse sentido, o modelo concebido para simulação para os recursos hídricos e produção de energia elétrica advém de duas abordagens distintas, porém complementares, a sistêmica e a analítica reducionista.



Tempestade sobre os Alpes - desenho de 1499, exposto na Windsor Royal Library

Figura 3.10 Modelo do conceito de ciclo hidrológico proposto por Leonardo da Vinci, por volta de 1500, adaptado de Christofolletti (1999, p. 100)

A abordagem analítica é a mais utilizada nas atividades científicas, o procedimento metodológico enfatiza o nível inferior da hierarquia da complexidade, por exemplo: as propriedades dos átomos são mais bem entendidas em termos de suas partículas fundamentais.

Por sua vez, a abordagem sistêmica considera que a análise do fenômeno deve ser realizada no seu próprio nível hierárquico. Desse modo, compreende-se o conjunto mais do que suas partes. A premissa é que o "todo é maior que o somatório das propriedades e relações de suas partes, pois há o surgimento de novas propriedades que não emergem do conhecimento das partes constituintes" (Christofolletti, 1999, p. 4).

As duas abordagens são necessárias para explicar e determinar as causas por meio de comparações e experimentos em todas as atividades científicas. No entanto, é preciso estar ciente da totalidade do sistema, da complexidade, da estrutura hierárquica e não apenas analisar parte por parte para depois realizar a síntese.

Nesse ponto, torna-se oportuno definir as nuances entre unidade, totalidade e complexidade (Christofolletti, 1999, p. 2-3):

- unidade – "representa a qualidade do que é um, único, só ou sem partes". Todavia, não significa que seja de entendimento trivial;
- totalidade – constituída pelo conjunto de partes, "cuja interação resulta numa composição diferente e específica, independente do somatório dos elementos

componentes”, ou seja, o todo não é igual a soma das partes, assim como possui uma estrutura e funcionalidade diferenciada; e

- complexidade – sistemas complexos<sup>41</sup> são identificados por meio “da diversidade de elementos, encadeamentos, interações, fluxos e realimentação”.

A fim de conceber sistemas e modelos aplicados aos recursos hídricos e à produção de energia elétrica em uma bacia hidrográfica, é necessário compreender o contexto. Os procedimentos metodológicos utilizados na concepção de sistemas e modelos dependem fortemente dos objetos de estudo e da visão de mundo adotada.

A visão de mundo condiciona a utilização dos recursos hídricos e a percepção dos riscos provenientes dos eventos analisados, além de consubstanciar os julgamentos de valores, as decisões e o *modus operandi* de grupos sociais e indivíduos. O objeto de estudo delimita as particularidades e as relações entre as partes e o todo do modelo.

No caso, os sistemas em produção de energia elétrica, em economia e em hidrologia são abertos e a dinâmica desenvolve-se sob um amplo espectro de configurações possíveis caracterizadas por escalas temporais e espaciais nem sempre precisas.

Portanto, um modelo de sistemas que objetiva alinhar cenários para a produção de energia elétrica, em uma bacia hidrográfica, é um sistema complexo pois, dentre outras características, inclui as incertezas inerentes à disponibilidade dos recursos hídricos presentes e futuras dos segmentos usuários das águas, além da relação desses segmentos com o consumo de energia elétrica, com o desenvolvimento e o crescimento econômico regional, com a agricultura intensiva em recursos hídricos, com o crescimento populacional e com o bem-estar social.

### 3.2.1.1 Equilíbrio do ciclo das águas

O ciclo hidrológico é um sistema em equilíbrio dinâmico, por exemplo: o volume de água que escoia nos continentes, dos rios para os oceanos, é evaporado nos oceanos, que retorna aos continentes por precipitação.



<sup>41</sup> Haigh (1985) define sistemas complexos como uma totalidade que é criada pela interação de um conjunto estruturado de partes componentes, cujas inter-relações estruturais e funcionais criam uma inteireza que não se encontra implicada por aquelas partes quando desagregadas.

Contudo, as alterações provocadas pelas atividades antrópicas, em especial as decorrentes das atividades econômicas, acarretam modificações localizadas no comportamento desse ciclo.

O desmatamento, por exemplo, altera alguns fluxos do ciclo hidrológico, como a evaporação. O volume evaporado é reduzido em razão da retirada da vegetação. Entretanto, não há maiores conseqüências para a precipitação, pois o "sistema climatológico local depende muito pouco da evaporação da superfície da área" (Tucci, 1998, p. 495).

A vazão média aumenta com a redução da vegetação florestal apenas quando o desmatamento é superior a um percentual significativo. Todavia, após o crescimento da nova vegetação, a vazão média pode ficar acima dos valores existentes pré-desmatamento. Esse efeito é notado após a supressão da vegetação para implantação de cultura anual, entre 300 e 450 [mm/ano]; de vegetação rasteira, entre 200 e 400 [mm/ano]; e de plantações de chá, borracha, cacau, entre 200 e 300 [mm/ano] (Bruijnzeel, 1996 *apud* Tucci, 1998, p. 500).

Singh (1992) afirma que outro aspecto relevante é a relação do binômio solo-água, ou seja, as categorias de uso do solo são fatores que influem, cada vez mais, nas características hidrológicas da bacia.

A Figura 3.11 e a Figura 3.12 assinalam de forma genérica as alterações, no ciclo hidrológico, ao longo do século XX, por meio de indicadores de temperatura e hidrológicos, respectivamente.

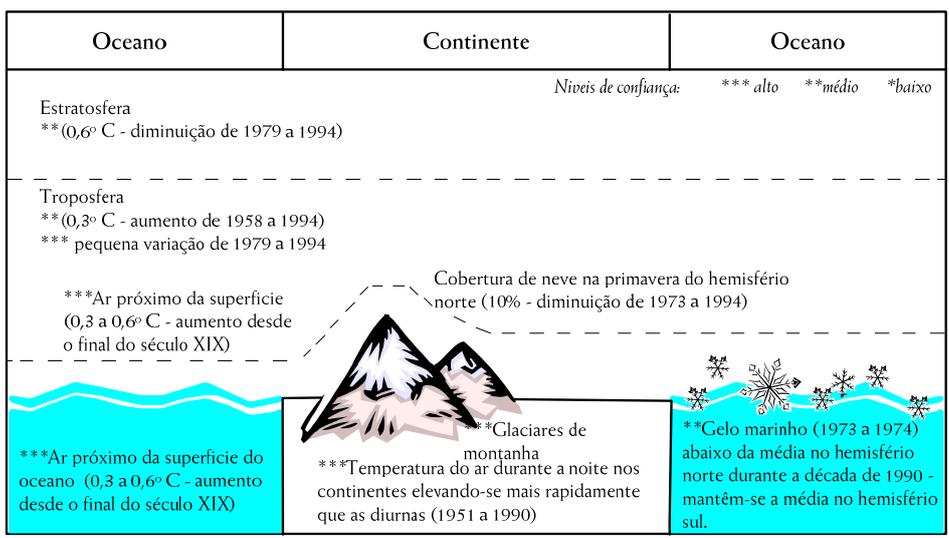


Figura 3.11 Esquema representativo das variações observadas sobre os indicadores de temperatura, nos continentes e nos oceanos, adaptado de Christofoletti (1999, p. 133)

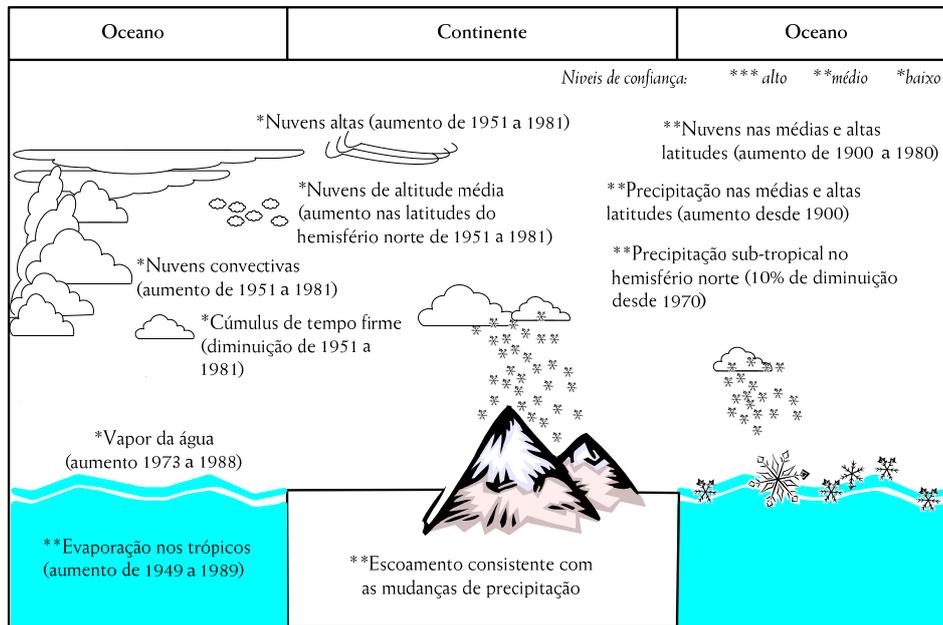


Figura 3.12 Esquema representativo das variações observadas sobre os indicadores hidrológicos, nos continentes e nos oceanos, adaptado de Christofolletti (1999, p. 133).

### 3.2.1.2 Disponibilidade hídrica e usos múltiplos

A disponibilidade hídrica é profundamente afetada pelo crescimento econômico e demográfico, e por atividades intensivas em recursos hídricos. O fluxo hídrico utilizado para atender às demandas não-consuntivas pode até "retornar ao sistema hidrológico, mas em quantidade menor que a retirada, pois uma parcela é consumida pela evaporação e uso biológico" (Christofolletti, 1999, p. 133).

O planejamento da operação do setor de energia elétrica tem como um de seus instrumentos as séries hidrológicas históricas. Essas séries podem ser estendidas com base na precipitação-vazão e contribuem para o equacionamento da disponibilidade de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional de energia elétrica (SIN). A base de dados de entrada, de precipitação e de evapotranspiração, para extrapolar essas séries históricas necessita ser "suficientemente longa [...]. A série de vazões resultante será composta de um período de valores observados e por outro gerado a partir da precipitação" (Tucci, 1998, p. 435). Essas séries resultantes são utilizadas com o objetivo de obter a vazão,  $Q_t$ , maior que a meta,  $Q_t^*$ , dos aproveitamentos de um determinado período,  $(a, b)$ , com base na série natural de afluições do rio, da seguinte forma:

$$Q_t \geq Q_t^* \quad \forall t \in [a, b] \quad (3.44)$$

As principais funções hidrológicas usadas para identificar a capacidade de regularização da bacia de forma isolada, segundo Tucci (1998, p. 449), são:

- a curva de permanência;
- a curva de probabilidade de vazões mínimas; e
- a simulação.

Dessas três características, a simulação representa um “procedimento mais preciso à medida que trata seqüencialmente o balanço do uso da água” (Tucci, 1998, p. 449). A simulação utiliza a seqüência histórica de vazões de acordo com a Equação (3.45) da continuidade.

$$S_t = S_{t-1} + \bar{Q}_t \Delta t + (P_t - E_t) k \bar{A}_t - Q_{s_t} \Delta t \quad (3.45)$$

em que:

$k \rightarrow$  fator de conversão dimensional  $(\frac{\Delta t}{10^3})$ ;

$S_t \rightarrow$  armazenamento  $[m^3]$ ;

$\bar{Q}_t \rightarrow$  vazão média de entrada no reservatório entre os intervalos mencionados  $[\frac{m^3}{s}]$ ;

$P_t \rightarrow$  precipitação no período  $[\frac{mm}{\Delta t}]$ ;

$E_t \rightarrow$  evaporação potencial no período  $[\frac{mm}{\Delta t}]$ ;

$\bar{A}_t \rightarrow$  área média do reservatório no período  $[km^2]$ ;

$Q_{s_t} \rightarrow$  vazão média de saída  $[\frac{m^3}{s}]$ ; e

$\Delta t \rightarrow$  intervalo de tempo  $[s]$ .

Por sua vez, a curva de permanência das vazões é uma expressão “cumulativa de freqüência da série temporal continua dos valores das vazões”. Para o planejamento energético, ela “corresponde à potência disponível entre 90% e 100% do tempo da curva de permanência” (Gomide *et al*, 1976, p. 171-2). Na análise de comparação entre diferentes bacias, representa-se a curva de permanência em termos de descargas específicas  $[\frac{L}{s.km^2}]$  ou em relação com vazão média  $[\frac{\%}{Q}]$

Nesse sentido, os procedimentos de planejamento e operação da bacia podem ser abordados, segundo Tucci (1998, p. 456), por meio de:

- técnicas de otimização – “processo extensivo quando o sistema apresenta um grande número de componentes e pequenos intervalos de tempo”; e
- simulação – “que define cenários específicos e verifica os resultados”.

### 3.2.2 Aplicações

A Dinâmica de Sistemas foi concebida “em berço” multidisciplinar e não é raro ser citada nas mais diversas áreas. Segundo Caubet (2004, 153-4), a teoria dos sistemas,

*é mais rara em outras áreas do conhecimento e praticamente inexistente no direito, onde bem poucos estudiosos possuem noções de teoria dos sistemas ... deve-se assinalar sua importância para trabalhar no limiar do III milênio, especialmente quando se trata de tentar fazer um trabalho interdisciplinar.*

Nesse sentido, os estudos em Dinâmica de Sistemas, após a publicação do relatório Meadows, foram ampliados e revistos por Richmond *et al* (1987)<sup>42</sup> e McKin *et al* (1993) por meio da modelagem orientada a objetos. O objetivo dos modelos desenvolvidos por Richmond e McKin foi simular os sistemas de bacias hidrográficas: planejamento, organização e operações nos trabalhos de controle das águas.

Todavia, a Dinâmica de Sistemas possui grande abrangência de aplicações. Bastos (2003) investigou o potencial de contribuição da Dinâmica de Sistemas em situações e estruturas de negócios do cotidiano de gestores, em que foram analisadas as ferramentas computacionais Stella, Powersim, iThink e Vensim, por meio de *survey*. Os resultados obtidos indicam que os benefícios do uso da Dinâmica de Sistemas, em especial, por sua capacidade de comunicação e estruturação da informação, são relevantes.

O Brasil possui uma matriz energética hidrotérmica, no qual as hidroelétricas são predominantes. Desse modo, a gestão de uma planta termoelétrica é um constante desafio para os investidores dispostos a participar do mercado de energia elétrica. Nesse contexto, Ortega (2001) desenvolveu uma metodologia de suporte ao planejamento da operação de termoelétricas por meio da Dinâmica de Sistemas. O objetivo da simulação foi analisar as políticas e as estratégias de uma empresa de termoelétricas no mercado de energia elétrica,

CS

<sup>42</sup> Modelo de escoamento e de regulagem de reservatórios denominado *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model* (SSARR). É uma aplicação auto-regulada utilizada para modelagem e simulação orientada a objetos.

considerando o plano decenal de expansão e vários cenários hidrológicos. A modelagem, por meio da Dinâmica de Sistemas, propiciou a análise quantitativa e qualitativa num único ambiente computacional.

Florentin (2000) aplicou a Dinâmica de Sistemas no planejamento da gestão de sistemas hidroelétricos, abrangendo aspectos multidisciplinares. Desenvolveu uma metodologia que permite avaliar o futuro em razão das decisões adotadas no presente por geradoras hidroelétricas. Essa avaliação é efetuada pela prospecção do comportamento dos seguintes aspectos (Florentin, 2000, p. 4):

- as restrições operacionais da planta hidrelétrica;
- as influências e as variáveis relativas ao mercado de energia elétrica; e
- as características operativas do sistema hidroelétrico.

A evolução do comportamento de duas plantas hidrelétricas foi simulada em dois ambientes computacionais - MatLab e PowerSim (Dinâmica de Sistemas) -, e os resultados obtidos foram próximos, comprovando que o modelo via Dinâmica de Sistemas é consistente e robusto. Ademais, permite análises de sensibilidade do comportamento operativo e de políticas empresariais (Florentin, 2000, p. 168-9).

Outra aplicação em planejamento da gestão foi efetuada por Schuch (2000). Nesse trabalho, foi desenvolvido um modelo de projeção da demanda de energia elétrica, considerando a participação dos novos agentes no mercado. Tradicionalmente, no curto prazo, a projeção da demanda é baseada na correlação entre as séries históricas de consumo de energia elétrica e os indicadores socioeconômicos. Já, no longo prazo, a projeção é efetuada por meio de técnicas de cenários sob incerteza. Schuch (2000) desenvolveu um modelo via Dinâmica de Sistemas e Teoria de Jogos, abordando simultaneamente o comportamento dos consumidores e das empresas de energia elétrica. Os resultados obtidos demonstram a adaptabilidade da Dinâmica de Sistemas, na "análise dos aspectos técnicos, gerenciais, econômicos e comportamentais envolvidos", no estudo de caso (Schuch, 2000, p. 156). Outrossim, ressalta-se que as políticas empresariais adotadas condicionam, significativamente, o comportamento dos consumidores e a participação no mercado de energia elétrica.

A abordagem sistêmica simplifica um problema complexo mantendo as informações mais relevantes para a solução. Como por exemplo, pode-se citar a simulação hidrológica

quantitativa do sistema da bacia do Rio dos Sinos apresentada por Antonio Eduardo Lanna (1997, p. 25-27). Nessa simulação a bacia do Rio dos Sinos foi dividida em sub-bacias. Em cada sub-bacia, foram estimadas as vazões naturais e as demandas por água. As variáveis de entrada são as vazões naturais e as demandas outorgadas. As variáveis de saída são as vazões e as falhas de suprimento em cada ponto considerado. Desse modo, a dinâmica do sistema é representada pela equação do balanço hídrico em cada ponto de captação

$$V(i,t) = Q(i,t) + \sum_{j \in M(i)} v(j,t) - \sum_{k \in U(i)} q(k,t) \quad (3.46)$$

em que

$V(i,t)$  → vazão defluente do ponto  $i$  durante o intervalo de tempo  $t$ ;

$Q(i,t)$  → vazão afluyente natural do ponto  $i$  durante o intervalo de tempo  $t$ ;

$v(j,t)$  → vazão defluente no ponto  $j$  imediatamente a montante do ponto  $i$ ;

$q(k,t)$  → vazão demanda pelo usuário  $k$  no ponto  $i$  durante o intervalo de tempo  $t$ ;

$M(i)$  → conjunto de vazões afluentes localizadas imediatamente a montante do ponto  $i$ ;

$U(i)$  → conjunto de retiradas de água no ponto  $i$ .

A relação dinâmica, que afeta os recursos hídricos, entre o crescimento urbano, o aumento populacional e a expansão da agropecuária foi pesquisada por Ruhoff (2004). Para tanto, foi simulado computacionalmente o escoamento superficial da água e dos processos erosivos. Os objetivos foram:

- avaliar a demanda hídrica, estipulando o volume de água infiltrado, evapotranspirado e escoado;
- avaliar o volume de solos perdidos; e
- projetar um cenário preservacionista, estipulando áreas para reflorestamento prioritário.

O estudo de caso foi efetuado, na bacia do Arroio Grande (RS), no período compreendido entre 1987 e 2000. Os resultados apontam que os reflexos do crescimento demográfico, em Santa Maria (RS), afetam os recursos hídricos da bacia.

Apesar da atenção crescente voltada para uma crise crônica nos recursos hídricos, o conjunto de ferramentas para avaliar e prever a disponibilidade de água ainda são limitados. Uma tentativa de modelar esses recursos globalmente foi efetuada por Simonovic (2002), por

meio da metodologia de Dinâmica de Sistemas. O modelo desenvolvido (Figura 3.13) aborda o uso dos recursos hídricos por seis segmentos que afetam o crescimento industrial: população, agricultura, economia, recursos de não renováveis, poluição.

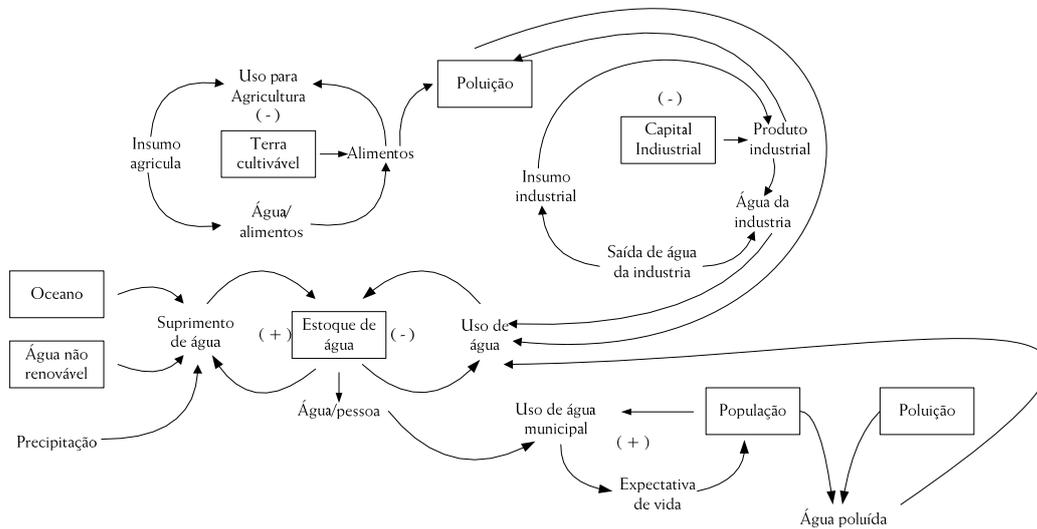


Figura 3.13 Diagrama do modelo *WorldWater* desenvolvido por Simonovic (2002, p. 256)

O modelo denominado *WorldWater* indica uma forte relação entre os recursos hídricos globais e o crescimento industrial futuro. Simonovic (2002, p. 266) chegou a duas importantes conclusões: (i) a água é um dos fatores que precisa ser considerado no modelo de desenvolvimento econômico; e (ii) a ausência de planejamento do uso da água acarretará conflitos e escassez.

### 3.3 Conclusões

A modelagem de bacias hidrográficas com a finalidade de obter a disponibilidade hídrica para produção de energia elétrica, considerando os usos múltiplos das águas e os demais agentes econômicos intervenientes, é um sistema parcialmente estruturado. Um sistema parcialmente estruturado ou não-estruturado é aquele em que, por exemplo, não há um algoritmo bem definido que concilie as variáveis econômicas, ambientais, sociais e técnicas, em uma ambiente comum.

O emprego da Dinâmica de Sistemas possibilita a construção de um modelo representativo da realidade – um “micro-mundo” -, no qual é possível acompanhar a evolução e as transformações das variáveis (de estado e de informação) envolvidas.

Desse modo, a Dinâmica de Sistemas oferece a possibilidade de simular as possíveis evoluções dos processos econômicos, sociais e ambientais intervenientes ao planejamento do uso da bacia hidrográfica para produção de energia elétrica, sendo, portanto, uma ferramenta factível para o planejamento integrado de recursos.

Os métodos multiobjetivos são capazes de incorporar diferentes valores (funções-desempenho) para o uso dos recursos hídricos. A técnica multicritério de apoio à decisão é um método de investigação no qual são apresentados claramente os resultados da distribuição dos benefícios e/ou custos do processo decisório, do envolvimento dos atores sociais e da mensuração das conseqüências dos valores julgados. É, também, por meio dessa técnica que se abre a possibilidade de quantificarem-se impactos políticos, econômicos e socioambientais na utilização dos recursos naturais (Sica e Camargo, 2004d).

Na construção de modelos multicritério que visam otimizar recursos naturais, tendo como um dos agentes de decisão a sociedade, surge, como uma das principais discussões, o equacionamento e inter-relação das funções-desempenho e a sustentabilidade do uso dos recursos naturais. Esta discussão diz respeito à forma como são utilizados os recursos pelas várias gerações, em pauta a suposição implícita na teoria do crescimento econômico ótimo: os indivíduos são todos iguais, não só na geração atual, mas em todas as gerações futuras, ou seja, a geração atual sente-se igualmente satisfeita em poupar uma quantidade de recurso para a geração futura ou em consumir o recurso hoje, contanto que este consumo para a geração futura seja descontado a uma determinada taxa de juros. Assim, as gerações são hipoteticamente consideradas como tendo indivíduos semelhantes e com os mesmos interesses (Sica, 2003, p. 49-50).

Este capítulo apresentou as técnicas e os métodos que podem ser adaptáveis ao problema de planejamento tratado nesta tese e a conjunção e implementação destes é objeto do próximo capítulo.

O processo para tomada de decisão se tornou mais democrático em razão dos novos atores sociais admitidos pelo Sistema Nacional de Recursos Hídricos, porém mais complexo.



## CAPÍTULO

# 4

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO

**U**MA das principais razões para modelar as interações entre os sistemas econômicos e ambientais foi a percepção de quão grande se tornaram os impactos ambientais provocados pelas atividades produtivas (Brouwer, 1987).

A disseminação de informações necessárias ao esclarecimento vem a atenuar a discrepância, durante o processo de tomada de decisão, entre os que têm conhecimento técnico e aqueles que não têm.

Uma das melhores formas de tratar as questões socioambientais, como é o caso dos recursos hídricos, é assegurar a participação, no nível apropriado, dos agentes afetados.

## 4 Modelo de produção de energia elétrica sob usos múltiplos

Antonio Eduardo Lanna (2002a, p. 751) afirma que o planejamento no setor de recursos hídricos deve “orientar e adequar as intervenções humanas no setor”. Ademais, deve servir como instrumento de coordenação e articulação entre as atividades complementares e conflitantes, a fim de torná-las eficientes.

A coordenação é alcançada por meio da legislação pertinente e das condições técnicas de contorno da operação dos recursos hídricos. A articulação, por sua vez, é efetivada pelas prioridades sociais e ambientais almejadas pelos agentes afetados.

Então, diante da coordenação e da articulação adequadas, o planejamento poderá promover:

### *1. A alocação dos recursos hídricos para os usos com maiores prioridades*

De acordo com a legislação vigente, isso fica a cargo das Agências de Água e dos Comitês de Bacia Hidrográfica. Os comitês devem definir a política de intercâmbio (*trade-off*) entre os agentes econômicos usuários de recursos hídricos, em caso de não-escassez, por meio dos Planos de Bacia e demais instrumentos previstos pela Lei nº 9.433/97.

### *2. O estabelecimento de um padrão de critérios para hierarquização, mesmo que relativa, e avaliação de cenários alternativos, considerando os usos múltiplos e as prioridades estabelecidas nos planos de bacia pelos comitês*

Apesar da grande incerteza inerente às projeções, em razão de variáveis como a disponibilidade hídrica e, principalmente, as econômicas, sociais e políticas, a elaboração de cenários, por meio da Dinâmica de Sistemas, é uma metodologia adequada.

### *3. O equacionamento de possíveis conflitos*

A Divisão de Recursos Naturais e Energia da Comissão Econômica para América Latina e Caribe (DRNE, 1993) publicou um guia de procedimentos no qual reconhece que o equilíbrio do meio ambiente depende dos acordos entre os atores sociais. Portanto, a tomada de decisão não será por outro meio senão por negociações sucessivas, além disso propõe uma

metodologia multicritério para o apoio à decisão, no âmbito dos recursos naturais energéticos, que envolve:

- identificação dos atores sociais afetados;
- determinação de critérios que sustentam a posição dos atores sociais;
- geração de alternativas de solução e hierarquização dessas;
- definição de estratégias e programas de ação.

A visão sistêmica integra a informação sobre o ecossistema ao processo de escolha. A escolha viável para ser considerada “a melhor possível” não precisa necessariamente ser a solução ótima, mas, sim Pareto-relevante. O estabelecimento de um sistema multicritério de apoio à decisão tende a formalizar a inclusão de variáveis não representadas nos modelos tradicionais de otimização.

O sistema de suporte à decisão objetiva servir de instrumento aos decisores. Caracteriza-se pela interatividade e por permitir a inserção do julgamento de valor, e devem ser aplicáveis à tomada de decisão parcialmente estruturada ou não-estruturada (Johnson, 1986).

## 4.1 Modelagem do sistema hidroenergético de estudo

O objeto de modelagem é a bacia hidrográfica do Jacuí, no Estado do Rio Grande do Sul, umas das mais importantes em virtude dos usos múltiplos da água, a saber: produção de energia elétrica, navegação, irrigação do cultivo de arroz e abastecimento público. A bacia do Rio Jacuí tem forma irregular localizada aproximadamente entre as latitudes de 28°10' e 30°45'S e as longitudes de 49°55' e 54°35'W (Figura 4.1).

A área de drenagem da bacia é de aproximadamente 71.600 km<sup>2</sup>, representando cerca de  $\frac{1}{4}$  da área total do Estado e 83,5% da região hidrográfica do Guaíba. De acordo com a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roesster (FEPAM), na área de drenagem da bacia do Jacuí localizam-se

*aglomerações urbanas de porte significativo, destacando-se as cidades de Santa Maria (face leste), Cachoeira do Sul, Rio Pardo, São Jerônimo, Triunfo, Caxias do Sul (face norte que drena para o Rio das Antas), Bento Gonçalves (drena para o Rio das Antas), Lajeado (Rio Taquari), Estrela (Rio Taquari) e Taquari (Rio Taquari) (FEPAM, 2008)*

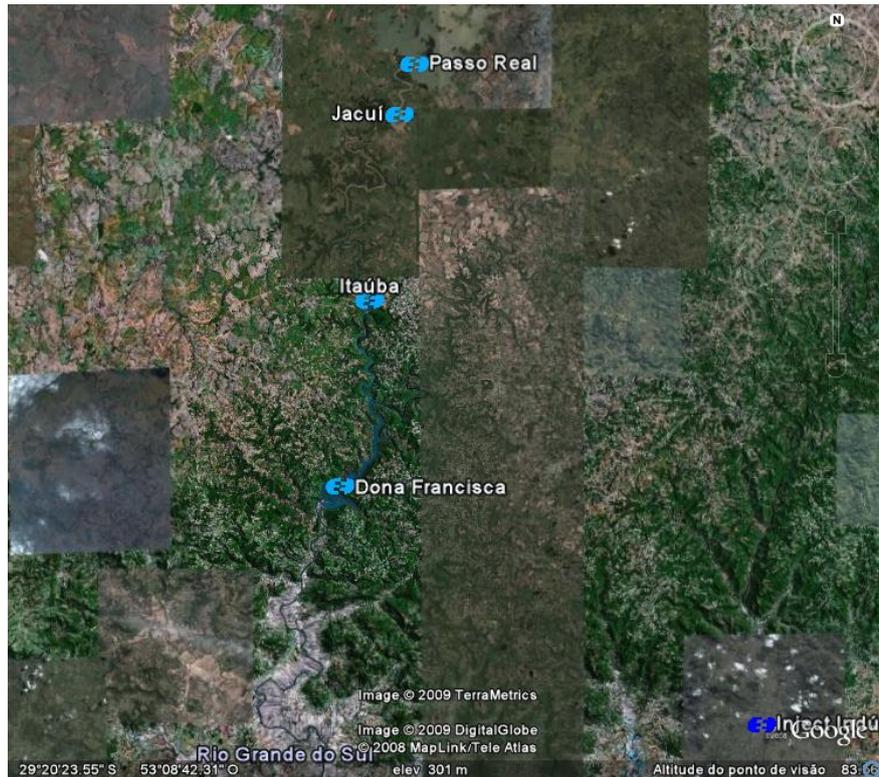


Figura 4.1 Visualização parcial da bacia do Jacuí (Google Earth, 2008)

Os conflitos por recursos hídricos na região não são incomuns, haja vista usinas hidrelétricas, em cascata, as três barragens de navegação (Fandango, Dom Marco e Amarópolis), as demandas por abastecimento público e industrial, além dos 78 mil hectares de cultivo de arroz que necessitam, segundo a FEPAM (2008), entre novembro e abril de, aproximadamente,  $140.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A resolução dos conflitos, a arbitragem e o consenso sobre os usos dos recursos hídricos estão a cargo dos quatro comitês de bacia instalados na região, a saber: Comitê Alto Jacuí, Comitê Baixo Jacuí, Comitê Vacacaí/Vacacaí-mirim e Comitê Pardo.

A capacidade instalada nas usinas hidrelétricas (UHE) de Passo Real, Jacuí, Itaúba e Dona Francisca, despachadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), são, respectivamente, 158 MW, 180 MW, 500 MW e 125 MW; a barragem de Enerstina é controlada pelo ONS apesar de não produzir energia elétrica (Figura 4.2). A bacia é responsável por, aproximadamente, 35% da energia demandada pelo Estado. A demanda restante é atendida pelas usinas termelétricas (UTE) Sepé Tiaraju, Uruguaiana, Presidente Médici e Charqueadas, sendo completada, majoritariamente, pelo fluxo de energia advindo do SIN.

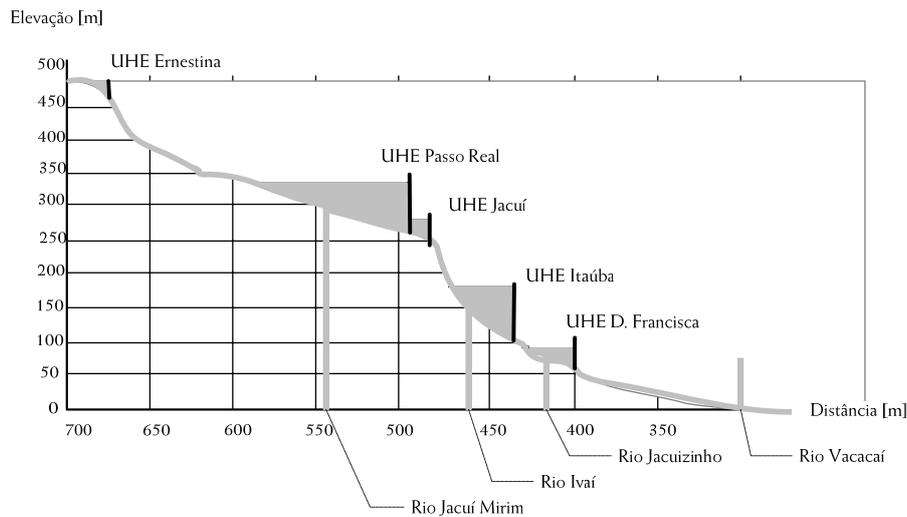


Figura 4.2 Perfil longitudinal da bacia do Rio Jacuí, adaptado de ONS (2006, p. 12)

O período crítico, no Estado, é o verão, em virtude das cargas industriais e da demanda térmica fria, ambas diurnas. A capacidade total de geração instalada no Estado é, cerca de, 2.619 MW, destes 1.357 MW são provenientes de hidrelétricas e 1.262 MW de termelétricas. Todavia, a referida capacidade não supre toda a demanda, caracterizando, assim o Estado do Rio Grande do Sul como "importador". Dessa maneira, e especificamente, para este modelo, o custo marginal de operação é minimizado ao produzir o máximo possível de energia advinda de hidrelétricas, diminuindo, portanto a importação pelo SIN e o despacho de termelétricas<sup>43</sup> no Estado. Outrossim, há a necessidade de garantir um determinado volume hidráulico no reservatório da UHE Passo Real, capaz de produzir certa quantidade de energia nas usinas hidrelétricas na bacia do Jacuí, em virtude dos limites de confiabilidade e estabilidade das linhas de transmissão responsáveis pela importação da energia elétrica do SIN e pelo atendimento à região metropolitana de Porto Alegre (Figura 4.3).

Desse modo, será simulado o comportamento do sistema composto pelas UHEs da bacia do Jacuí, com as devidas restrições hidráulicas (ONS, 2007a), sendo Passo Real com reservatório e as demais a fio d'água (Figura 4.4). A UHE Enerstina apesar de ser parte do SIN não será simulada em virtude de não produzir energia elétrica, mesmo sendo um reservatório de regularização na bacia hidrográfica.

<sup>43</sup> Esta afirmação se refere em virtude do Estado do Rio Grande do Sul ser considerado importador e não é análoga para otimização do SIN.

Os cenários serão construídos, tendo como entradas:

- as séries históricas reconstituídas de vazão afluente natural<sup>44</sup>, de 1940 a 2007;
- os volumes requeridos pelos usos múltiplos, nos trechos de bacia entre cada UHE e a jusante de Dona Francisca; e
- a importância relativa (*trade-off*) de cada uso múltiplo.

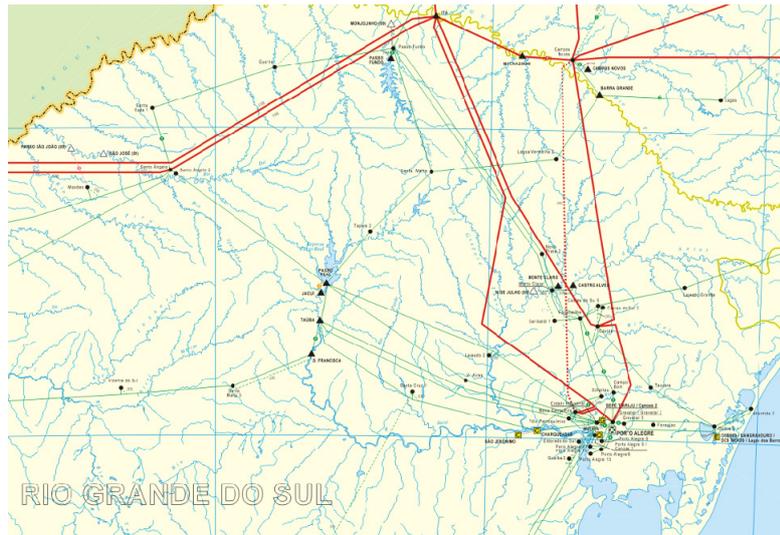


Figura 4.3 Localização das usinas hidrelétricas e interligação por linhas de transmissão, ONS horizonte de 2010

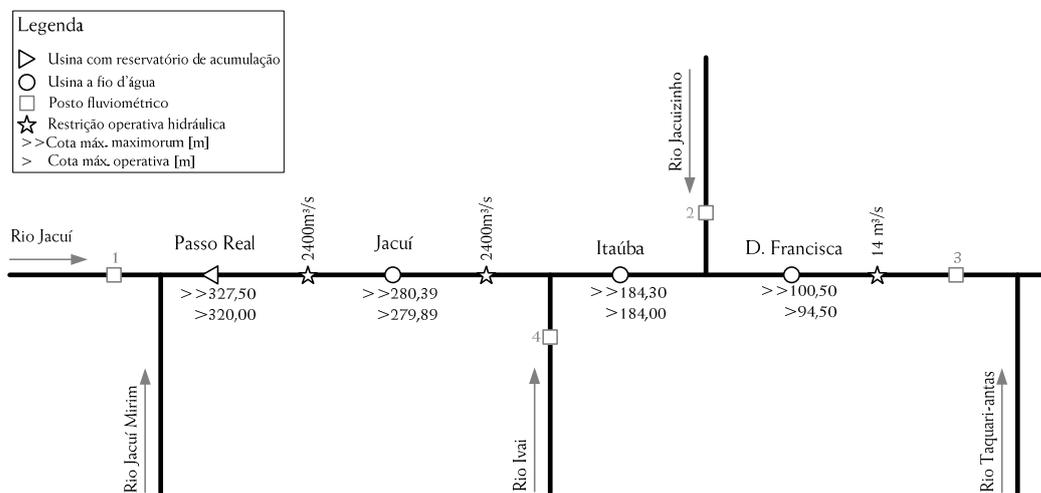


Figura 4.4 Diagrama operativo hidráulico simulado da bacia do Rio Jacuí, adaptado de ONS (2006, p. 5)

A simulação tem um horizonte de 60 meses (planejamento) e todo volume de água inserido no leito da bacia é considerado com sinal positivo (+), já, para o volume retirado do



<sup>44</sup> A série de vazão afluente natural é o histórico de vazões sem a influência da operação de reservatórios, gerada justamente para se utilizar em estudos – gentilmente, fornecida e autorizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conforme nota em Agradecimentos.

leito da bacia, o sinal é negativo (-), ambos com distribuição uniforme – desse modo, as afluições tem sinal positivo (+) e as outorgas negativo (-). Ademais, o modelo é constituído por quatro submodelos (Figura 4.5), a saber:

- de crescimento demográfico;
- de demanda hídrica;
- de *trade-off*; e
- de geração de energia elétrica.

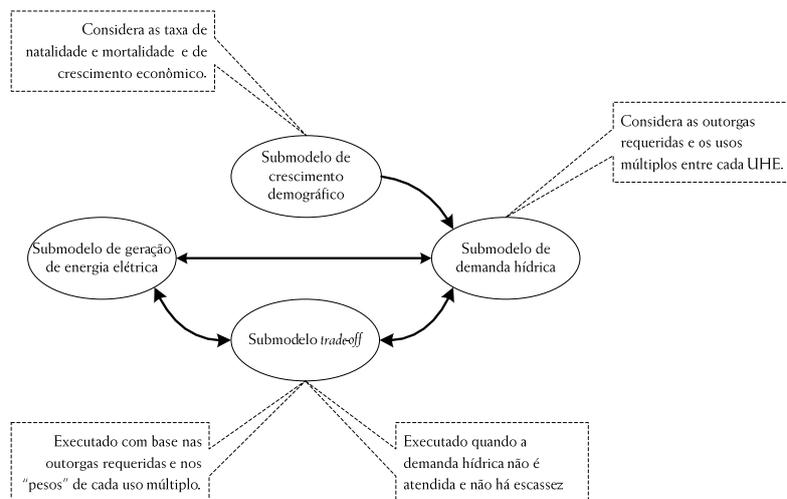


Figura 4.5 Visão geral do modelo em Dinâmica de Sistemas

### 4.1.1 Submodelo de crescimento demográfico

O modelo de crescimento demográfico é uma adaptação do modelo *Urban 1*, desenvolvido por Forrester e publicado no livro *Urban Dynamics* (Forrester, 1969). O modelo considera o crescimento populacional baseada nas taxas de natalidade, de imigração e emigração, além da expectativa de vida, na Figura 4.6a. No horizonte de simulação de 100 anos, há forte tendência de estabilização populacional sob equilíbrio dinâmico. Ao longo desse período, o incremento de cidadãos acarreta construção de novos lares ao mesmo tempo em que há demolição de outras edificações.

Dessa forma, juntamente ao submodelo de crescimento populacional, é executado o submodelo simulação do crescimento da quantidade de residências, baseado nas taxas de construção e de demolição, conforme diagrama de laço causal na Figura 4.6b. Outrossim, a demasiada ocupação, na média, de indivíduos por residência aquece o mercado imobiliário

provocando um aumento na construção. Por um lado, esse aquecimento pode ser, também, provocado pelo aumento na expectativa de vida e atratividade econômica local. Todavia, por outro lado, a alta taxa de ocupação do território habitado e a baixa disponibilidade de terra podem acarretar a retração do mercado imobiliário horizontal de residências (casas) e um aquecimento no mercado vertical (apartamentos), diminuindo a área média de uma residência. Isso pode contrair o crescimento populacional por falta de expectativa econômica – uma vez que, conseqüentemente, o custo médio da residência e os custos de serviços associados aumentam – ou, simplesmente, pela diminuição do espaço físico.

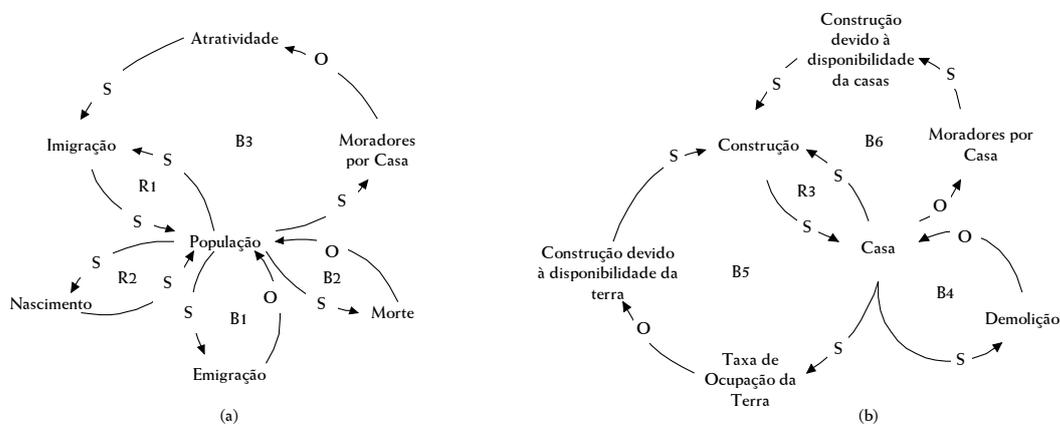


Figura 4.6 Diagrama de laços causais dos modelos de (a) crescimento populacional e (b) residências, adaptado de Forrester (1969)

Para simulação do submodelo de crescimento demográfico, de 1950 a 2050 (Figura 4.7), foram utilizados dados fornecidos pelo IBGE (2008), na região considerada da Bacia do Jacuí. Na ausência de dados disponíveis, foi efetuada uma interpolação linear. Os resultados foram confrontados com os dados disponíveis, até o momento, pelo histórico do IBGE (2008), para calibração e validação.

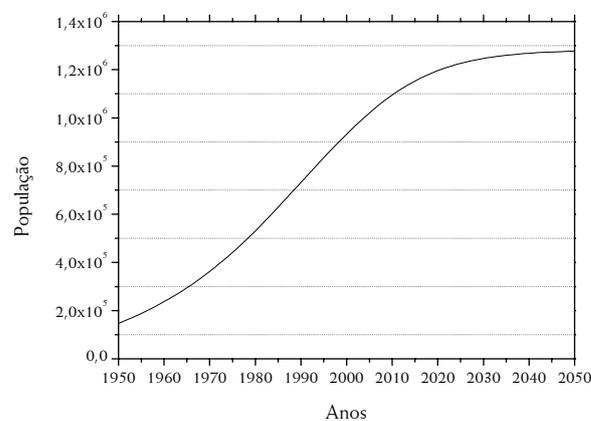


Figura 4.7 Submodelo de crescimento demográfico - validação.

O comportamento do submodelo reflete a tendência de equilíbrio dinâmico e estabilização, além da desaceleração lenta e gradual do crescimento após determinado nível de ocupação do território.

Após a calibração e validação, os submodelos de crescimento populacional (Figura 4.8) e de residências (Figura 4.9) foram acoplados aos demais submodelos. A variação do número de indivíduos, durante o horizonte de simulação (5 anos – 60 meses) implica variação do consumo de recursos hídricos para o abastecimento publico e concorrendo, dessa forma, com os demais usos múltiplos.

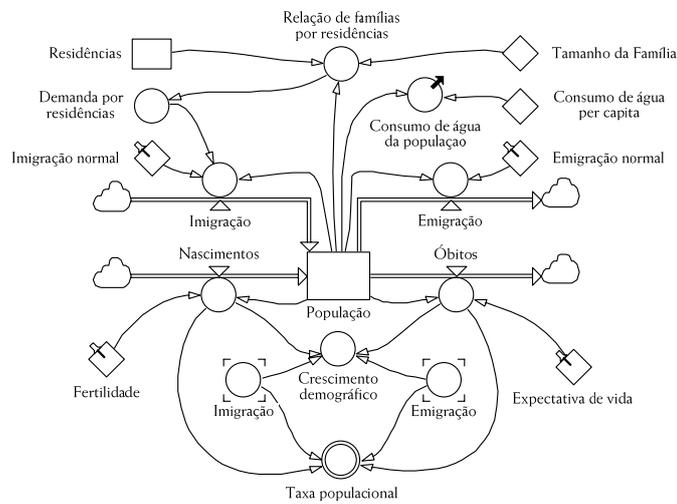


Figura 4.8 Submodelo de crescimento populacional

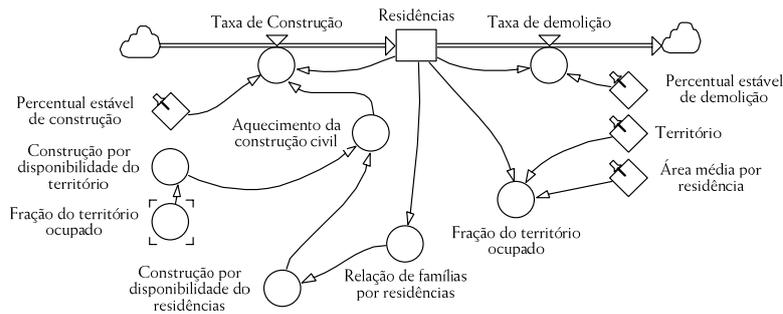


Figura 4.9 Submodelo de residências

### 4.1.2 Submodelo de demanda hídrica

Os usos múltiplos considerados neste submodelo são classificados, conforme a legislação vigente anteriormente exposta, ou seja:

- uso múltiplo  $u_1^m$  – concessionárias e autorizadas de geração de energia elétrica;

- uso múltiplo  $u_2^m$  – setor de irrigação;
- uso múltiplo  $u_3^m$  – serviço público de água e esgoto;
- uso múltiplo  $u_4^m$  – setor industrial;
- uso múltiplo  $u_5^m$  – setor hidroviário e portuário; e
- uso múltiplo  $u_6^m$  – setor de pesca e lazer.

Ademais, pressupõe, a cada trecho entre usinas, a possibilidade de ocorrência de uso múltiplo, sendo o uso múltiplo  $u_1^m$  sujeito à outorga e à variabilidade das aflúncias, segundo série histórica selecionada para simulação; o uso múltiplo  $u_2^m$ , sujeito à outorga, à sazonalidade e à intensificação da demanda segundo taxa de crescimento da área cultivada (Figura 4.10); o uso múltiplo  $u_3^m$ , sujeito ao modelo de crescimento demográfico e à intensificação das atividades econômicas (Figura 4.10); o uso múltiplo  $u_4^m$ , sujeito à outorga e à intensificação da demanda segundo taxa de crescimento das atividades industriais (Figura 4.10); o uso múltiplo  $u_5^m$ , sujeito à outorga e ao calado do transporte hidroviário para escoamento da produção agro-industrial; e o uso múltiplo  $u_6^m$ , sujeito à demanda de manutenção da vida da fauna e flora, segundo a vazão ecológica - vazão mínima defluente.

Taxa de crescimento anual da demanda por recursos hídricos		
$u_1^m$		concessionárias e autorizadas de geração de energia elétrica
$u_2^m$	0,04	Irrigação setor de irrigação
$u_3^m$	0,02	Ativ. econ. serviço público de água e esgoto, aquecimento econômico
$u_4^m$	0,02	Industria setor industrial
$u_5^m$		setor hidroviário e portuário
$u_6^m$		setor de pesca e lazer (vazão ecológica)

Figura 4.10 Interface do modelo de crescimento anual da demanda hídrica

A Figura 4.10 mostra a interface na qual o usuário pode auferir os valores do percentual de crescimento anual da demanda hídrica para os setores de irrigação, de uso industrial e de serviço público de água e esgoto, este último, também, sofre influência do aquecimento econômico regional – estipulado no submodelo de crescimento demográfico.

Os valores dos volumes requeridos, para os usos múltiplos utilizados em simulação, estão dispostos no Apêndice B, sob a forma de tabelas – caso o trecho não possuir outorga para algum dos usos não será auferido nenhum valor. O modelo de demanda hídrica (Figura

4.11) fornece como saída a vazão afluyente para as UHEs Jacuí (Qa2), Itaúba (Qa3) e Dona Francisca (Qa4). Já, a vazão afluyente para a UHE Passo Real (Qa1) é obtida pela série histórica (Apêndice B - Tabela 5.1 e Tabela 5.2).

Ademais, pressupõe-se a possibilidade de simular a preferência (ou não) do atendimento à demanda hídrica, para cada trecho, pela variável denominada *Atendimento à Demanda*. Optar por essa preferência significa modificar a filosofia de operação da usina de reservatório a montante (no caso Passo Real), em que, sob engolimento máximo da turbina, o volume defluente será alcançado com a maior abertura do vertedouro a fim de atender aos usos múltiplos. Em contrário, a simulação desconsidera a necessidade do volume de água para atendimento dos usos múltiplos  $U^m = \{u_2^m, u_3^m, u_4^m\}$ .

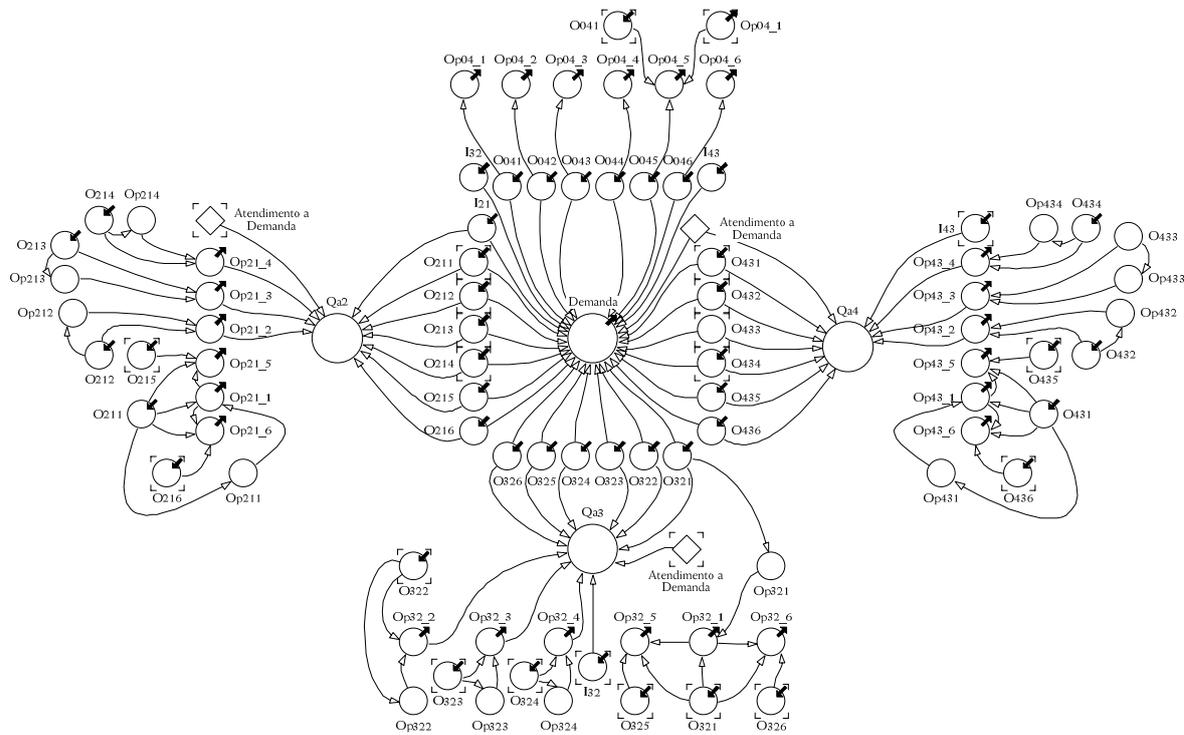


Figura 4.11 Submodelo de demanda hídrica

A tabulação dos dados de outorga dos usos múltiplos mostra a convenção adotada (Tabela 4.1), na qual o último algarismo refere-se ao tipo de uso múltiplo e os dois primeiros ao trecho de referência. Por exemplo: O212 refere-se à demanda outorgada de recursos hídricos para irrigação no trecho de bacia entre as usinas hidrelétricas de Passo Real e Jacuí. Já, O321, refere-se à demanda outorgada de recursos hídricos para produção de energia elétrica no trecho T32, ou seja, para a UHE Itaúba.

Tabela 4.1 Referência de tabulação de outorga dos usos múltiplos

Outorga	Trecho	Usinas	Uso 1	Uso 2	Uso 3	Uso 4	Uso 5	Uso 6
Requerida	21	Passo Real (1) e Jacuí (2)	O211	O212	O213	O214	O215	O216
	32	Jacuí (2) e Itaúba (3)	O321	O322	O323	O324	O325	O326
	43	Itaúba (3) e D. Francisca (4)	O431	O432	O433	O434	O435	O436
Proporcional	21	Passo Real (1) e Jacuí (2)	Op21_1	Op21_2	Op21_3	Op21_4	Op21_5	Op21_6
	32	Jacuí (2) e Itaúba (3)	Op32_1	Op32_2	Op32_3	Op32_4	Op32_5	Op32_6
	43	Itaúba (3) e D. Francisca (4)	Op43_1	Op43_2	Op43_3	Op43_4	Op43_5	Op43_6

No caso da demanda hídrica (totalidade das outorgas dos usos múltiplos) ser superior à vazão incremental afluente no trecho<sup>45</sup>, ou seja, se os volumes requeridos não forem atendidos e não ser decretado estado de escassez<sup>46</sup>, obtém-se, por meio do submodelo de *trade-off*, os valores proporcionais de vazão a serem colocados à disposição dos usos múltiplos no trecho considerado

### 4.1.3 Submodelo de trade-off

O submodelo de *trade-off* (Figura 4.12) é executado durante a simulação em cada trecho entre UHE, ou seja, quatro vezes para cada estágio de tempo do horizonte de 60 meses simulado, totalizando 240 vezes. Caso a oferta de água, no trecho de bacia entre as UHEs, for inferior à demanda e não for estado de escassez (conforme legislação vigente), o volume de recursos hídricos disponível será alocado conforme a importância relativa de cada uso.

Para tanto, é necessário um método que direcione a busca pelos novos valores de volumes de recursos hídricos a serem alocados ao mais próximo possível dos valores de volumes inicialmente requeridos (meta) pelos usos múltiplos no trecho. Não obstante, a proposta deste trabalho é desenvolver um método interativo, no qual cada decisor possa

<sup>45</sup> Considera-se a vazão afluente distribuída uniformemente nos trechos de bacia entre usinas hidrelétricas.

<sup>46</sup> De acordo com a Lei nº 9.433/97, “em situação de escassez de água, a prioridade é dessedentar humanos e animais”.

explicitar o valor da importância do recurso hídrico para o uso múltiplo em questão, assumindo o risco futuro.

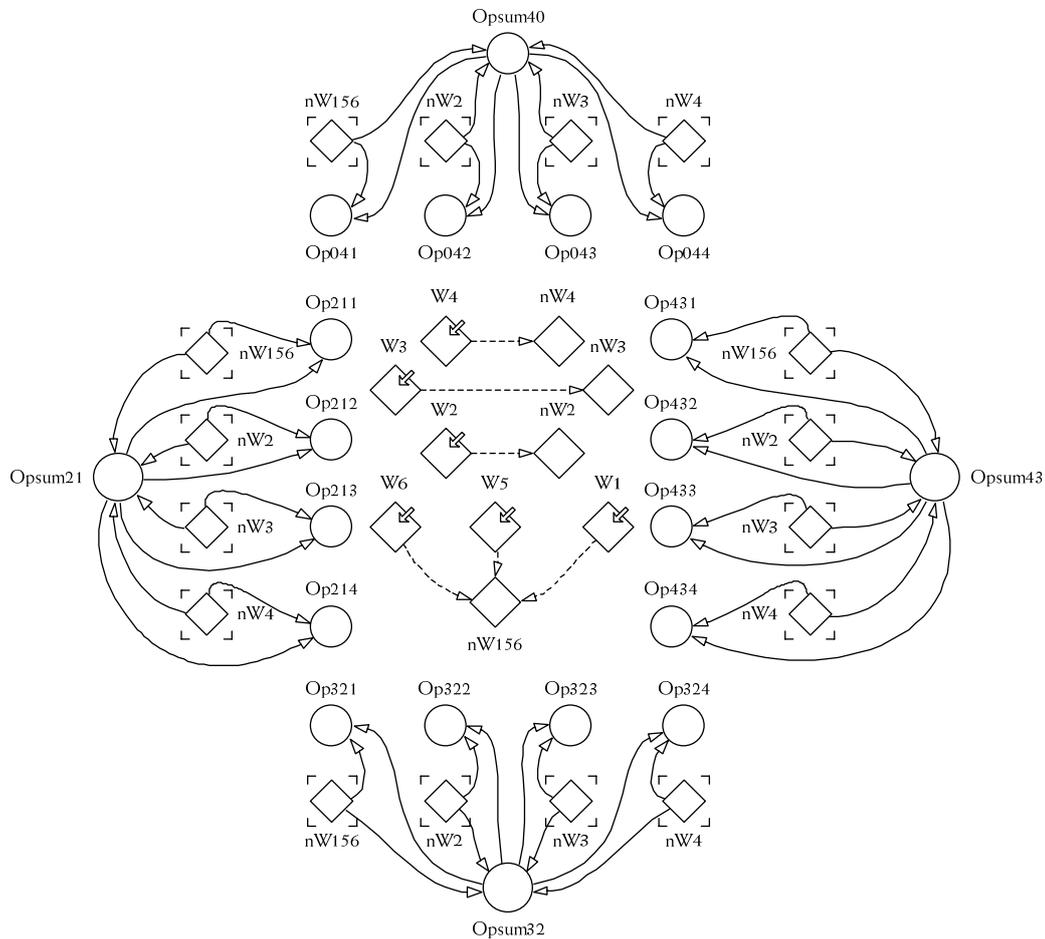


Figura 4.12 Submodelo de trade-off

Dentre as conclusões a que chegaram Hobbs *et al* (1992) ao tratar sobre qual método escolher para resolver um problema de planejamento de recursos hídricos se destacam: (i) os planejadores preferem métodos mais simples e transparentes; (ii) os participantes do planejamento nem sempre são unânimes quanto ao método ou, simplesmente, não desejam método algum; e (iii) os métodos clássicos de pesos e de *trade-offs* podem, por vezes, não representar o intercâmbio que os decisores estão dispostos a fazer. Outrossim, no processo decisório da área de recursos hídricos, existem visões distintas sobre as metas a serem alcançadas, em virtude do conflito de interesses sobre o uso da água.

Nesse sentido, a Metodologia *Multicriteria Decision Aid* (MCDA) se enquadra perfeitamente. Assim, os decisores, por exemplo, de um Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) podem construir um modelo de árvore de decisão (Figura 4.13), a fim de definir os



Após obter os *trade-offs*, é necessário definir o método responsável pela alocação do volume de água disponível no trecho de bacia. O método de alcançar meta aplicado por Haimes e Hall (1975) no estudo sobre otimização multiobjetivo para sistemas de recursos hídricos, enquadra-se nas necessidades de formulação deste submodelo. Desse modo, de acordo com o problema (3.34), o submodelo de *trade-off*, inicialmente, foi modelado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & \min \gamma \\
 & \text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^4 Op_{i,i-1,t}(u_j^m) = -Vdis_{i,i-1,t} \\
 & \quad -Op_{i,i-1,t}(u_j^m) - \gamma w^n(u_j^m) \leq O_{i,i-1,t}(u_j^m), \quad \forall j = \{1, 2, 3, 4\} \\
 & \quad -Op_{i,i-1,t}(u_j^m) \geq \beta, \quad \forall j = \{1, 2, 3, 4\} \\
 & \quad \sum_{j=1}^4 |w^n(u_j^m)| = 1 \\
 & \quad \gamma \in \mathbb{R}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

sendo

$$w^n(u_j^m) \begin{cases} j = \{2, 3, 4\} \rightarrow w^n(u_j^m) = \frac{1 - w(u_j^m)}{3} \\ j = \{1, 5, 6\} \rightarrow w^n(u_j^m) = \frac{1 - \sum_{j=\{1,5,6\}} w(u_j^m)}{3} \end{cases} \tag{4.2}$$

$$\beta = -O_{i,i-1,t}(u_j^m) \frac{\max_{j=\{1,5,6\}} (O_{i,i-1,t}(u_j^m))}{O_{i,i-1,t}(u_1^m)} \tag{4.3}$$

$$Vdis_{i,i-1,t} = I_{i,i-1,t} + Qd_{i-1,t} \tag{4.4}$$

em que

- $O_{i,i-1,t}(u_j^m)$  é o volume outorgado para  $j$  entre UHEs,  $i$  e  $i-1$ , no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Op_{i,i-1,t}(u_j^m)$  é o volume proporcional para  $j$  entre UHEs  $i$  e  $i-1$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $w(u_j^m)$  é o *trade-off*  $w$  auferido ao uso múltiplo  $j$  na bacia hidrográfica;
- $w^n(u_j^m)$  é o *trade-off*  $w^n$  de não-preferência do uso múltiplo  $j$  na bacia hidrográfica;
- $Vdis_{i,i-1,t}$  é o volume disponível entre UHEs,  $i$  e  $i-1$ , no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $I_{i,i-1,t}$  é o volume natural incremental entre as UHEs  $i$  e  $i-1$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Qd_{i,t}$  é o volume defluente da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];

$\beta$  é a variável de proporcionalidade entre o volume da UHE e os demais usos; e  
 $\gamma$  é uma variável auxiliar irrestrita.

Nesse problema (4.1) multiobjetivo, o *trade-off* de cada uso múltiplo atuará como penalidade,  $w^n$ , ou seja, de não-preferência. Portanto, o uso múltiplo com maior preferência terá o seu pedido inicial (outorga,  $O_{i,j-1,t}$ ) reduzido em menor proporção do que o uso múltiplo com menor importância relativa, que, por sua vez, tem uma redução maior. A outorga,  $O_{i,j-1,t}(u_j^m)$ , do uso múltiplo,  $j$ , ou meta,  $z_i^*$ , do problema (3.34), é obtido pela leitura do dado de entrada (Apêndice B - Tabela 5.3, Tabela 5.4, Tabela 5.5 e Tabela 5.6).

As importâncias relativas, problema (4.2), ou seja, *trade-off* de não-preferência,  $w^n$ , para cada uso múltiplo,  $j = \{2, 3, 4\}$ , são determinados de maneira inversamente proporcional aos *trade-offs* de preferência,  $w$ , para os usos múltiplos  $u_j^m$ , pois estes usos são consuntivos e, portanto, não compartilham o recurso. Já, para os usos múltiplos,  $j = \{1, 5, 6\}$ , os *trade-offs* de não-preferência,  $w^n$ , são determinados de maneira inversamente proporcional aos *trade-offs* de preferência,  $w$ , para os usos múltiplos  $u_j^m$ , pois estes usos são não-consuntivos e, portanto, compartilham o recurso a montante da UHE.

A restrição  $\beta$ , Equação (4.3), do problema (4.1) garante que o volume calculado,  $Op_{i,j-1,t}(u_j^m)$ , para cada uso múltiplo será proporcional ao menor volume de água requerido por usos não-consuntivos (normalmente, vazão ecológica), pois este não deverá ser aproveitado pelos usos múltiplos consuntivos, no entanto a UHE a jusante usufrui dele. Dessa forma, esta a restrição de mínimo garante uma proporcionalidade equânime aos demais usos sobre o volume aproveitado pelo uso múltiplo  $u_1^m$ .

Todavia, assim como os demais métodos multiobjetivos, a solução encontrada é extrema e nem sempre representa o intercâmbio desejado. Ademais, o método dificilmente é acessível à compreensão da totalidade dos decisores, os quais, portanto, podem desconfiar da solução, contestando-a.

Destarte, outra formulação factível, com solução contida na região viável de Pareto assim como a formulação (4.1), pode ser equacionada da seguinte maneira:

$$Op_{i,i-1,t}(u_j^m) = \max_{O_{i,i-1,t}} \left\{ (w^n(u_j^m) - 1) O_{i,i-1,t}(u_j^m) \frac{Vdis_{i,i-1,t}}{\sum_{j=1}^4 [(1 - w^n(u_j^m)) O_{i,i-1,t}(u_j^m)]}, O_{i,i-1,t}(u_j^m) \right\} \quad (4.5)$$

em que  $w^n(u_j^m)$  obtido conforme Equação (4.2),  $Vdis_{i,i-1,t}$  obtido conforme Equação (4.4) e

$O_{i,i-1,t}(u_j^m)$  é o volume outorgado para  $j$  entre UHEs,  $i$  e  $i-1$ , no estágio  $t$  [ $hm^3$ ];

$Op_{i,i-1,t}(u_j^m)$  é o volume proporcional para  $j$  entre UHEs  $i$  e  $i-1$  no estágio  $t$  [ $hm^3$ ];

$w^n(u_j^m)$  é o *trade-off*  $w$  de não-preferência do uso múltiplo  $j$  na bacia hidrográfica; e

$Vdis_{i,i-1,t}$  é o volume disponível entre UHEs,  $i$  e  $i-1$ , no estágio  $t$  [ $hm^3$ ];

Ressalta-se, contudo, que, em ambas as formulações, Equação (4.1) e Equação (4.5), os usos múltiplos destinados a concessionárias e autorizadas de geração de energia elétrica,  $u_1^m$ , ao setor hidroviário e portuário,  $u_5^m$ , e ao setor de pesca e lazer,  $u_6^m$ , compartilham do direito de não-uso<sup>47</sup> do recurso natural, ou seja, suas preferências têm as importâncias relativas agregadas (Figura 4.13), conforme Equação (4.2), por direito compartilhado.

A simulação, para uma mesma série histórica de afluências, indica, na média, resultados para outorga proporcional com certa proximidade, porém com diferentes interpretações (Tabela 4.2). A formulação do problema (4.1) procura a solução extrema para uma menor redução em relação à outorga requerida, ou seja, o *trade-off*, desta forma, representa o custo marginal da redução em  $1 \frac{bm^3}{mês}$  do volume de outorga requerido, segundo uma preferência construída,  $\Lambda_{pq}$ . Entretanto, isso não condiz com a forma participativa de construção do *trade-off* e da gestão descentralizada dos recursos hídricos. Ora, dessa maneira, dever-se-ia proceder à otimização centralizada do uso dos recursos hídricos, segundo o uso múltiplo de maior benefício marginal econômico ou de menor custo marginal de redução em  $1 \frac{bm^3}{mês}$ . Nesse sentido, a atividade econômica usuária do recurso natural de maior benefício à Nação teria uma menor redução do volume de água.

☞

<sup>47</sup> Os usos múltiplos,  $u_{j=\{1,5,6\}}^m$ , não-consuntivos têm por prerrogativa que o recurso hídrico não seja retirado do leito da bacia, pois estes usos compartilham o uso do recurso na sua atividade econômica.

Tabela 4.2 Comparação entre os volumes proporcionais de outorga, em determinado estágio de simulação

Uso Múltiplo	Trade-off $w^n$	Outorga requerida	Outorga proporcional [ $hm^3$ ]		Redução percentual	
			Solução para (4.1)	Solução para (4.5)	Solução para (4.1)	Solução para (4.5)
$u_{j=\{1,5,6\}}^m$	-21,66%	-614,952	460,5772	457,0927	25,10%	25,67%
$u_{j=2}^m$	-26,40%	-4,88808	0,292449	3,377294	94,02%	30,91%
$u_{j=3}^m$	-20,51%	-0,42048	0,025157	0,360173	94,02%	14,34%
$u_{j=4}^m$	-31,42%	-0,10512	0,006289	0,070955	94,02%	32,50%

A formulação do problema (4.5) atinge uma solução não-extrema dentro da região viável de Pareto e, portanto, uma solução Pareto-relevante, sob ponderação dos *trade-offs*,  $\Lambda_{pq}$ , por meio de MCDA. O *trade-off* atua analogamente à formulação do problema (4.1). Todavia, para o problema (4.5), que foi simulado e utilizado neste trabalho, o *trade-off* tem um significado pautado no consenso político do CBH sobre a importância relativa dos usos múltiplos para a bacia. A redução da outorga ocorre de maneira proporcional à penalidade,  $w^n$ , e ao volume de outorga requerida. Ademais, Hobbs e Meiyer (2000) e Prato e Herath (2006) aplicaram o MCDA em diversos problemas envolvendo os recursos naturais e energéticos, na esfera pública e na esfera privada, confirmando que “o planejamento deve ser pautado, de preferência e quando possível, em métodos mais simples e transparentes” (Hobbs *et al*, 1992).

#### 4.1.4 Submodelo de geração de energia elétrica

O submodelo de geração de energia elétrica simula o comportamento operativo de quatro usinas hidrelétricas (UHEs) em cascata, conforme diagrama da Figura 4.15. O sistema desconsidera o reservatório de Ernestina, a evapotranspiração, a evaporação do espelho d'água nos reservatórios e as perdas hidráulicas no conduto forçado. O volume de espera no reservatório de Passo Real e a reserva hídrica requerida para estabilidade das linhas de transmissão responsáveis pela importação do SIN podem ser relacionados à variável *volume de aversão*<sup>48</sup> do reservatório.



<sup>48</sup> O volume de aversão é o percentual do volume útil do reservatório abaixo do qual não é possível deplecioná-lo.

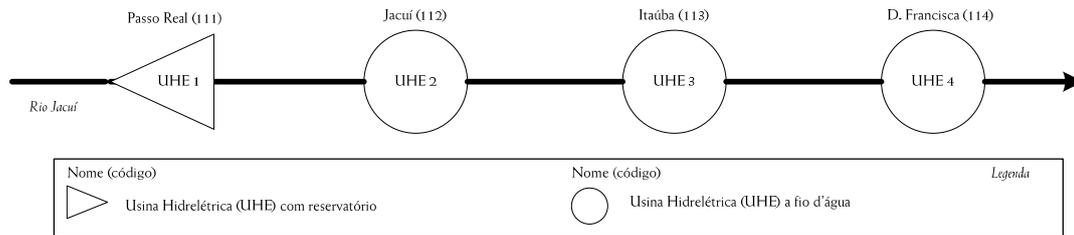


Figura 4.15 Diagrama de simulação

A série histórica, dado de entrada, é estacionária, portanto não se considera que a modificação do binômio solo-água produza efeitos relevantes durante o horizonte de simulação de 60 meses. A referida série pode ser manipulada para gerar vários cenários diferentes, conforme a necessidade, sendo possível carregar uma série iniciando de 1940 a 2002 e, também, abrandar ou reforçar as afluições por meio do coeficiente de ajuste (Figura 4.16). Ademais, tanto a série histórica<sup>49</sup> como as outorgas<sup>50</sup> são consideradas sob uma distribuição uniforme em cada trecho entre UHEs.

**Agregação da Vazão Natural**  
 Utilizando a série histórica de afluições, porém sem reflexo da operação do SIN

**Carrega a série histórica de afluição do ano de**    
 Intervalo de 5 anos a partir de 1940 até 2002

**Coeficiente de ajuste de afluição**   
 Seca - redução (menor que um)   
 Inundação - aumento (maior que um)

Figura 4.16 Interface para o carregamento da série histórica reconstituída de afluição natural

Destarte, o submodelo de geração de energia elétrica permite o acompanhamento das variáveis de decisão correlacionadas à produção de energia, à condição operativa da usina hidrelétrica, ao nível de recursos hídricos a cada trecho da bacia, entre outras, conforme submodelo de fluxo da Figura 4.17.

O submodelo pode ser visto particularizado da seguinte forma:

- a UHE de Passo Real na Figura 4.18;
- a UHE de Jacuí na Figura 4.19;
- a UHE de Itaúba na Figura 4.20; e



<sup>49</sup> Variáveis de entrada de fluxo da bacia, portanto com sinal positivo (+).

<sup>50</sup> Variáveis de saída de fluxo da bacia, portanto com sinal negativo (-).

- a UHE de Dona Francisca na Figura 4.21.

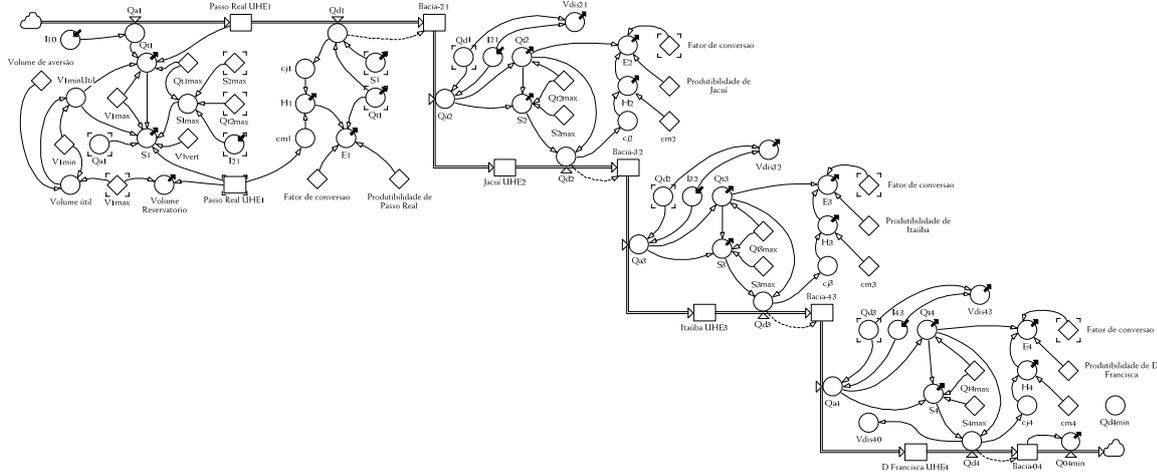


Figura 4.17 Submodelo de geração de energia elétrica

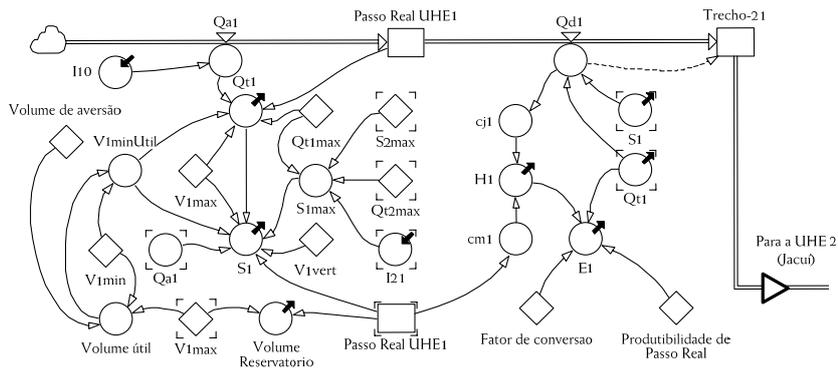


Figura 4.18 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Passo Real

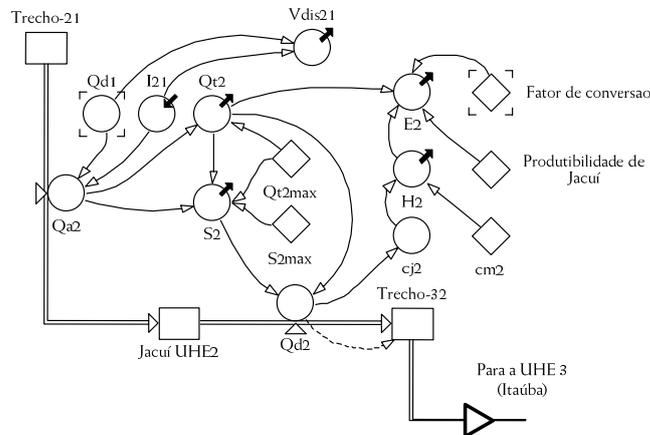


Figura 4.19 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Jacuí

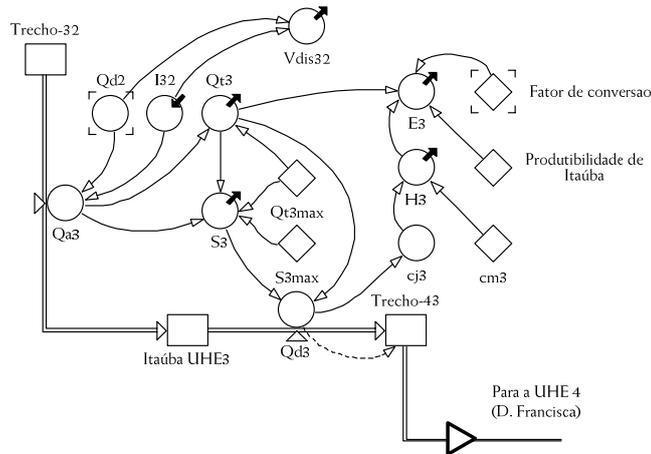


Figura 4.20 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Itaúba

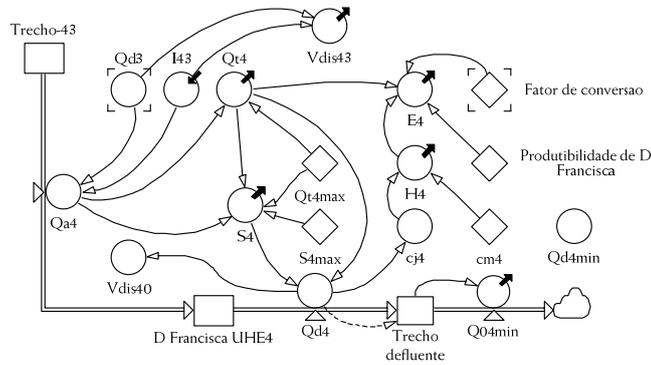


Figura 4.21 Submodelo de geração de energia elétrica – UHE Dona Francisca

Para cada estágio,  $t$ , do horizonte de 60 meses simulado, o submodelo de geração de energia elétrica objetiva o engolimento máximo da turbina a fim de maximizar a energia,  $E_{it}$ , ver Equação (4.6) e Figura 4.22, produzida pelo conjunto das usinas hidrelétricas,  $i$ ,

$$\max \sum_{i=1}^4 E_{it} \tag{4.6}$$

sendo

$$E_{it} = \rho_{it} b_{it}^b \frac{Q_{it}}{2,628} \tag{4.7}$$

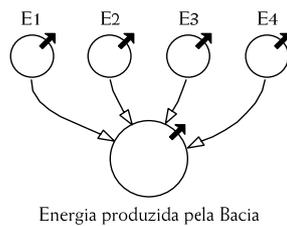


Figura 4.22 Modelo de energia produzida na bacia

O problema (4.6) é simulado com as seguintes variáveis de decisão, condicionantes e restrições operativas,

$$Qa_{it} \begin{cases} I_{i,j-1,t} + Qd_{i-1,t} + \sum_{j=2}^4 O_{i,j-1,t}(u_j^m) + \min_{j=1,5,6} \left( O_{i,j-1,t}(u_j^m) \right) \geq 0, & I_{i,j-1,t} + Qd_{i-1,t} + \sum_{j=2}^4 O_{i,j-1,t}(u_j^m) \\ I_{i,j-1,t} + Qd_{i-1,t} + \sum_{j=2}^4 O_{i,j-1,t}(u_j^m) + \min_{j=1,5,6} \left( O_{i,j-1,t}(u_j^m) \right) < 0, & I_{i,j-1,t} + Qd_{i-1,t} + \sum_{j=2}^4 Op_{i,j-1,t}(u_j^m) \end{cases} \quad (4.8)$$

$$Qa_{it} = I_{i,j-1,t} + Qd_{i-1,t} \quad (4.9)$$

$i \neq 1$   
 $D=0$

$$b_{it}^b = cm_{it} - cj_{it} \quad (4.10)$$

$$cj_{it} = b_{0,i} + b_{1,i} \left( \frac{Qd_{it}}{2,628} \right) + b_{2,i} \left( \frac{Qd_{it}}{2,628} \right)^2 + b_{3,i} \left( \frac{Qd_{it}}{2,628} \right)^3 + b_{4,i} \left( \frac{Qd_{it}}{2,628} \right)^4 \quad (4.11)$$

$$cm_{it} = a_{0,i} + a_{1,i}v_{it} + a_{2,i}v_{it}^2 + a_{3,i}v_{it}^3 + a_{4,i}v_{it}^4 \quad (4.12)$$

$$v_{i,t+1} = v_{it} + Qa_{it} - s_{it} - Qt_{it} \quad (4.13)$$

$$v_{it}^{útil} = (v_{it}^{max} - v_{it}^{min}) v_{it}^{aversão} \quad (4.14)$$

$$s_{it} = 0 \quad \forall \quad v_{it} \leq v_{it}^{vert} \quad (4.15)$$

$$I_{i,j-1,t} = A_i - A_{i-1} \quad (4.16)$$

$$Qd_{it} = s_{it} + Qt_{it} \quad (4.17)$$

$$v_{it}^{min} < v_{it} < v_{it}^{útil} \quad (4.18)$$

$$Qd_{it} < Qd_{it}^{max} \quad (4.19)$$

$$Qt_{it} < Qt_{it}^{max} \quad (4.20)$$

$$s_{it} < s_{it}^{max} \quad (4.21)$$

em que

$E_{it}$  é a energia produzida pela UHE  $i$  no estágio  $t$  [MW médio];

$b_{it}^b$  é a altura de queda bruta média da UHE  $i$  no estágio  $t$  [m];

$\rho_i$  é a produtibilidade específica da UHE  $i$  [MW / m<sup>3</sup>/s / m];

$cm_{it}$  é a cota montante da UHE  $i$  [m];

$cj_{it}$  é a cota jusante da UHE  $i$  [m];

$a_{n,i}$  são os  $n$  coeficientes do polinômio de cota montante da UHE  $i$  no estágio  $t$ ;

$b_{n,i}$  são os  $n$  coeficientes do polinômio de cota jusante da UHE  $i$  no estágio  $t$ ;

- $v_{it}$  é o volume inicial armazenado no reservatório da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $v_{it}^{max}$  é o volume máximo armazenado no reservatório da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $v_{it}^{vert}$  é o volume mínimo no reservatório da UHE  $i$  no estágio  $t$  para vertimento [ $\text{hm}^3$ ];
- $v_{it}^{min}$  é o volume mínimo armazenado no reservatório da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $v_{it}^{util}$  é o volume útil do reservatório da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $v_{it}^{aversão}$  é o volume de aversão do reservatório da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $s_{it}$  é o volume vertido pela UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $s_{it}^{max}$  é o volume máximo vertido pela UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Qt_{it}$  é o volume turbinável pela UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Qt_{it}^{max}$  é o volume máximo turbinável pela UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Qa_{it}$  é o volume afluente da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Qd_{it}$  é o volume defluente da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Qd_{it}^{max}$  é o volume máximo defluente da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $I_{i,j-1,t}$  é o volume natural incremental entre as UHEs  $i$  e  $i-1$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $O_{i,j-1,t}(u_j^m)$  é o volume outorgado para  $j$  entre UHEs,  $i$  e  $i-1$ , no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $Op_{i,j-1,t}(u_j^m)$  é o volume proporcional outorgado a  $j$  entre UHEs  $i$  e  $i-1$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ];
- $A_i$  é o volume natural afluente reconstituído da UHE  $i$  no estágio  $t$  [ $\text{hm}^3$ ]; e
- $D$  é a variável da política de atendimento à demanda hídrica,  $D = \{0,1\}$
- $U^m$  é o conjunto de usos múltiplos outorgáveis,  $U^m = \{u_1^m, u_2^m, u_3^m, u_4^m, u_5^m, u_6^m\}$ , sendo:
  - 1 – concessionárias e autorizadas de geração de energia elétrica;
  - 2 – setor de irrigação;
  - 3 – serviço público de água e esgoto;
  - 4 – setor industrial;
  - 5 – setor hidroviário e portuário; e
  - 6 – setor de pesca e lazer.

*As características técnicas e operativas, tais como os valores de máximo e mínimo para o reservatório, vertedouro e turbinas (Tabela 4.3), e os valores dos coeficientes para os polinômios de cota (*

Tabela 4.4) foram obtidos por meio do Software HydroEdit (ONS, 2007b).

Tabela 4.3 Coeficientes para os polinômios de cota jusante e montante (ONS,2007b)

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	Coef. montante
2,9393799E+02	2,3973800E-02	-9,6547892E-06	2,3008699E-09	-2,4199000E-13	111 - Passo Real
2,7989004E+02	0,0000000E+00	0,0000000E+00	0,0000000E+00	0,0000000E+00	112 - Jacuí
1,8400000E+02	0,0000000E+00	0,0000000E+00	0,0000000E+00	0,0000000E+00	113 - Itaúba
9,4500000E+01	0,0000000E+00	0,0000000E+00	0,0000000E+00	0,0000000E+00	114 - D. Francisca
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	Coef. jusante
2,7780000E+02	5,5458600E-03	-1,6359400E-06	2,8092800E-10	-1,6781900E-14	111 - Passo Real
1,8137000E+02	5,5720800E-03	-1,6055200E-06	2,8396500E-10	-1,8106200E-14	112 - Jacuí
9,1920000E+01	5,4478800E-03	-1,4621000E-06	1,9309940E-10	-9,6520200E-15	113 - Itaúba
5,3332500E+01	4,8108400E-03	-2,4017100E-06	8,9888700E-10	-1,2641100E-13	114 - D. Francisca

Tabela 4.4 Características técnicas das usinas hidrelétricas (ONS, 2007b)

Volume do reservatório [ $bm^3$ ]				Volume máximo [ $bm^3$ ]		Produtibilidade de Específica $\left[ \frac{MW}{\frac{m^3}{s}} \right]$	UHE
inicial	máximo	mínimo	vertimento <sup>51</sup>	vertedouro	engolimento		
2916,80	3646,00	289,00	1668,06	4330,9440	1082,7360	0,009221	Passo Real
-	29,00	29,00	29,00	2459,8080	614,9520	0,008731	Jacuí
-	620,00	620,00	620,00	6517,4400	1629,3600	0,009221	Itaúba
-	330,00	330,00	330,00	3952,5120	988,1280	0,008633	D. Francisca

## 4.2 Simulação

O modelo foi simulado, pelo método de integração de Runge-Kutta de quarta ordem no *software* de Dinâmica de Sistemas, segundo o histórico das vazões afluentes ocorridas entre os anos de 1950 a 1954 (série 1950-4) e de 1980 a 1984 (série 1980-4), pois representam uma das mais baixas e elevadas afluições, respectivamente. Para tanto, os valores das outorgas requeridas (SEMA, 2007) a cada trecho de bacia entre UHEs e a jusante de UHE D. Francisca se encontram no Apêndice B. A outorga para o abastecimento público (Figura 4.23) a jusante da UHE D. Francisca é função do submodelo de crescimento demográfico, que, para o horizonte de simulação, considerou os dados demográficos vigentes (IBGE, 2008) na região da Bacia Hidrográfica do Jacuí e o consumo per capita em 160 litros por dia por pessoa (incluindo perdas).

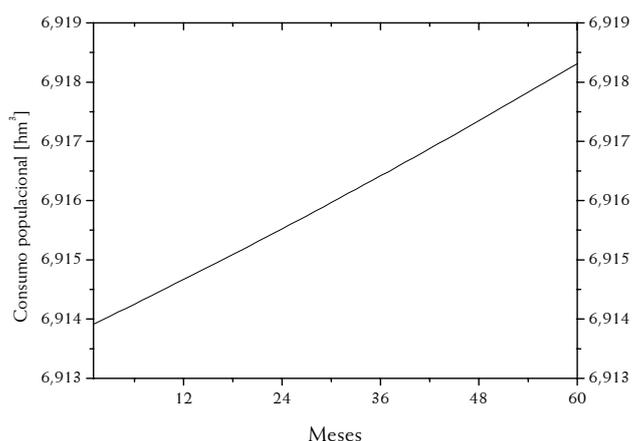


Figura 4.23 Consumo para o abastecimento público no horizonte de simulação

A energia produzida na bacia hidrográfica pelas usinas hidrelétricas e o atendimento às outorgas requeridas a jusante da UHE Passo Real dependem das afluições e do volume de



<sup>51</sup> Volume mínimo para ocorrer o vertimento na usina hidrelétrica.

aversão do reservatório de Passo Real, que é o percentual do volume útil abaixo do qual não é deplecionado.

Desse modo, as supracitadas séries foram os dados de entrada para a simulação variando o volume de aversão de 0% a 70%, de 5 em 5%, para analisar o comportamento da energia produzida na bacia (Figura 4.24) e do reservatório de Passo Real (Figura 4.25). As simulações foram realizadas pressupondo uma política de atendimento à demanda hídrica a jusante,  $D = 1$ , e ignorando-a,  $D = 0$ .

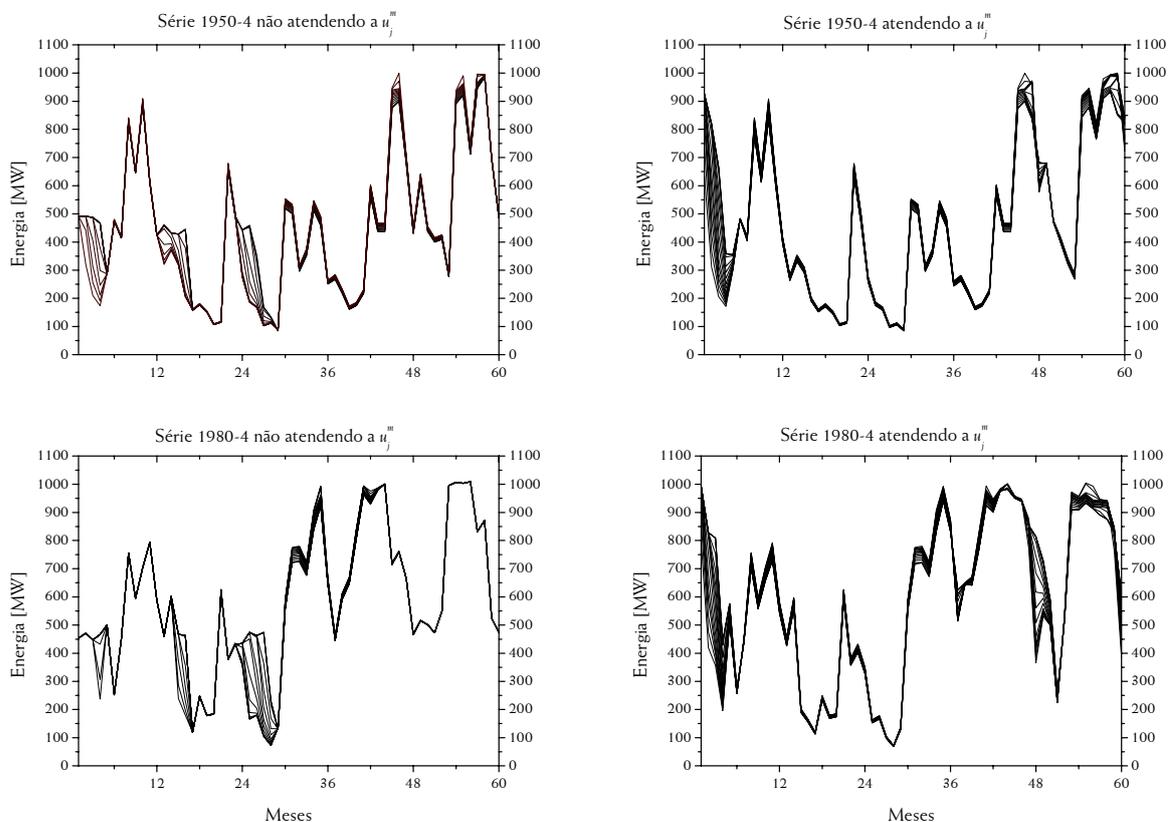


Figura 4.24 Energia produzida na bacia hidrográfica segundo volumes de aversão de 10% a 70%

A Figura 4.24 e a Figura 4.25 demonstram que a definição do *volume de aversão* afeta significativamente a energia produzida na bacia e, conseqüentemente, o recurso hídrico disponível para atender a demanda hídrica a jusante.

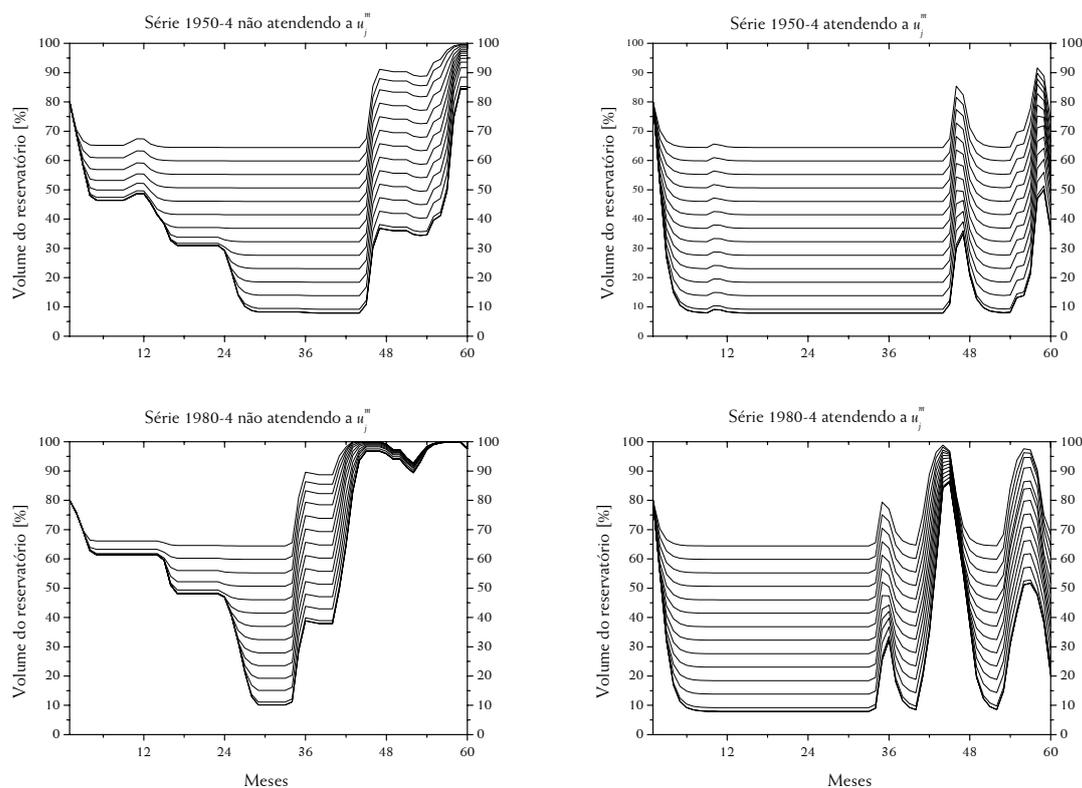


Figura 4.25 Volume total do reservatório de Passo Real segundo volumes de aversão de 10% a 70%

No entanto, necessita-se de uma análise mais detalhada sobre o comportamento da energia produzida na bacia e do volume do reservatório. Desse modo, a Figura 4.26 mostra a correlação entre a média dos 60 meses simulados da energia produzida na bacia hidrográfica e a média do volume percentual do reservatório dos 60 meses simulados para cada *volume de aversão* (de 0% a 70%) em todas as séries.

Observa-se que quanto maior o *volume de aversão* menor a quantidade total de energia possível quando ignorada a demanda hídrica a jusante. Entretanto, relaxar o *volume de aversão* pode implicar em um aumento da probabilidade de *déficit* de fornecimento de energia elétrica, ou seja, deplecionar o reservatório pode elevar o risco de não atender a demanda de energia elétrica no futuro. Já, sob a política de atendimento dos demais usos múltiplos verifica-se um intervalo de valores para o *volume de aversão* que corresponde a uma maior quantidade de energia produzida. Isso ocorre, pois ao definir o volume em que o reservatório não pode ser deplecionado, existe um maior *déficit* de atendimento à demanda hídrica a jusante de Passo Real, obrigando, assim, a execução do submodelo de *trade-off* para definição de valores proporcionais as outorgas requeridas. Entretanto, relaxar o *volume de aversão* pode implicar em um aumento da probabilidade de *déficit* de fornecimento de energia elétrica, ou seja, ao

deplecionar o reservatório pode ser elevado o risco de não atender a demanda de energia elétrica.

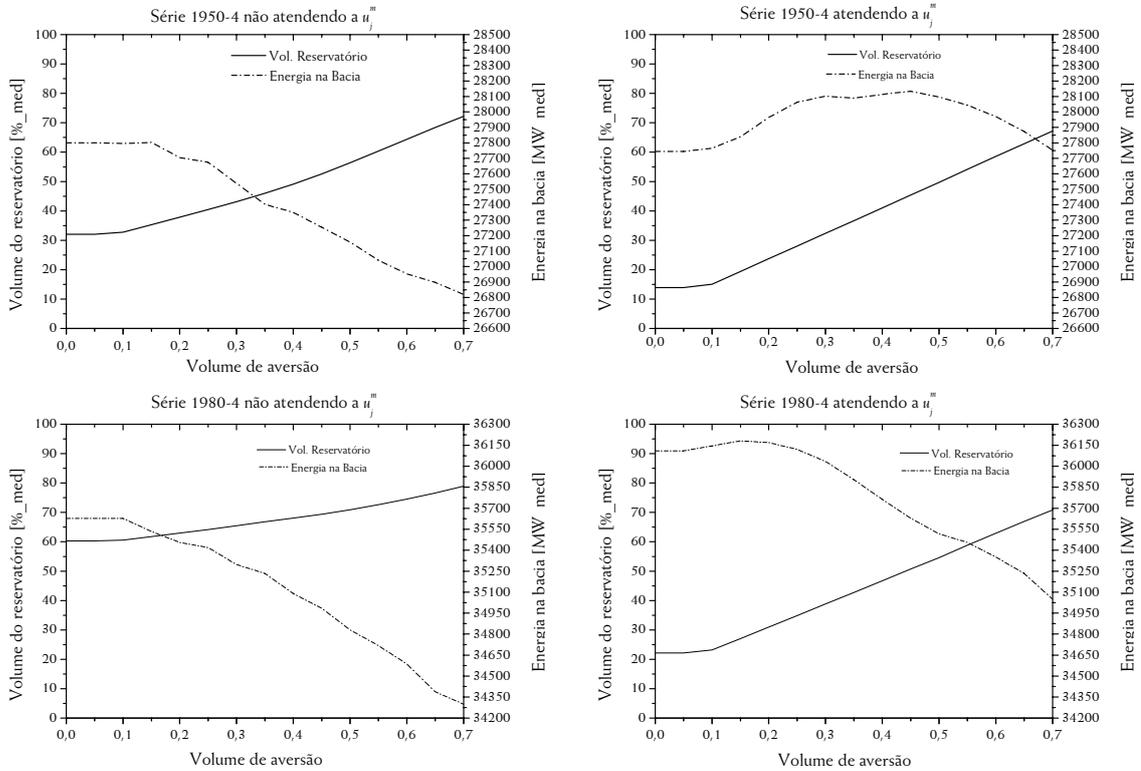


Figura 4.26 Energia média produzida na bacia pela média do volume percentual do reservatório segundo o volume de aversão

Diante disso, escolheu-se arbitrariamente o valor de 40% para o *volume de aversão*, a fim simular o submodelo. Tanto para série 1950-4 quanto para série 1980-4, o comportamento do volume do reservatório (Figura 4.27) apresenta uma diferença relevante ao comparar as políticas de atendimento à demanda hídrica, pois ao ignorá-la o reservatório permanece provido de um volume maior. Contudo, observa-se que ao atender as outorgas requeridas o reservatório tende a permanecer por um período considerável sob o piso mínimo estabelecido pela variável *volume de aversão*.

Já, o comportamento da energia produzida na bacia (Figura 4.28) apresenta uma diferença tênue ao comparar as políticas de atendimento à demanda hídrica. Isso se reflete no comportamento da energia produzida em cada usina hidrelétrica para as séries 1950-4 (Figura 4.29) e 1980-4 (Figura 4.30).

Todavia, ao supor uma outorga de amplitude relevante, por exemplo,  $100 \text{ hm}^3/\text{mês}$ , entre as UHEs Passo Real e Jacuí a diferença atinge uma ordem de 0,56% na série 1950-4 e isto se

agrava sob afluições menores e/ou sob maiores valores de outorgas, assim como para diferentes valores do volume de aversão (Figura 4.26).

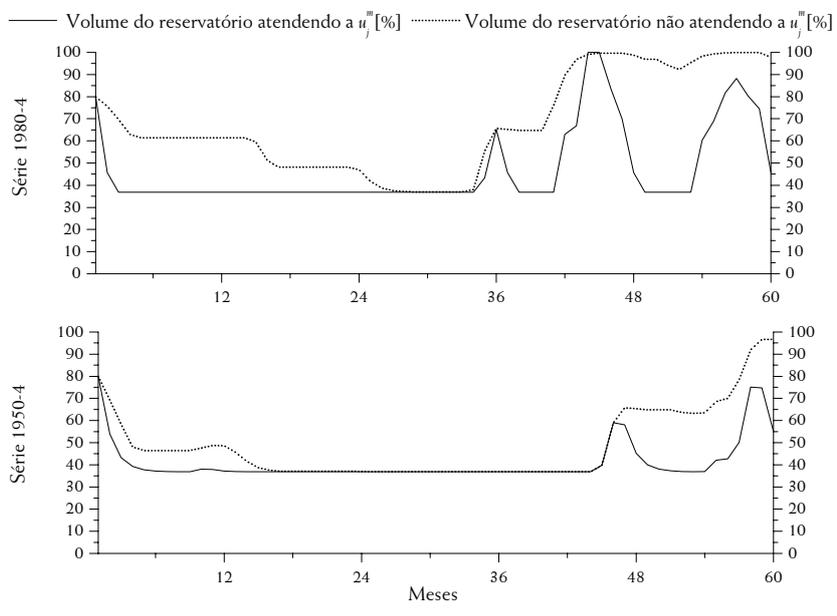


Figura 4.27 Reservatório da UHE Passo Real sob volume de aversão em 40%

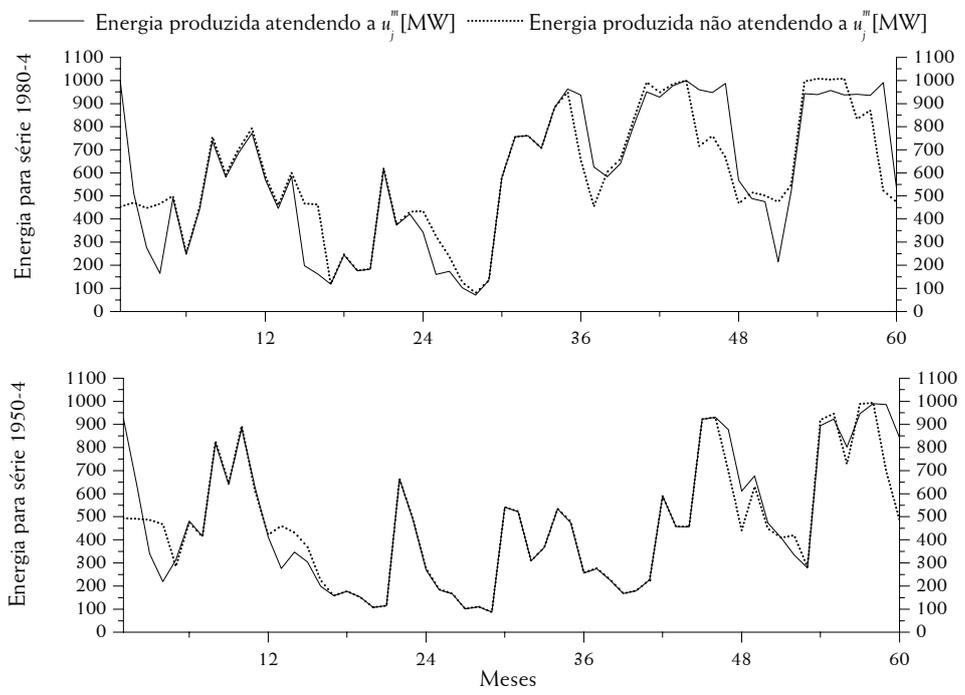


Figura 4.28 Energia produzida na bacia sob volume de aversão em 40%

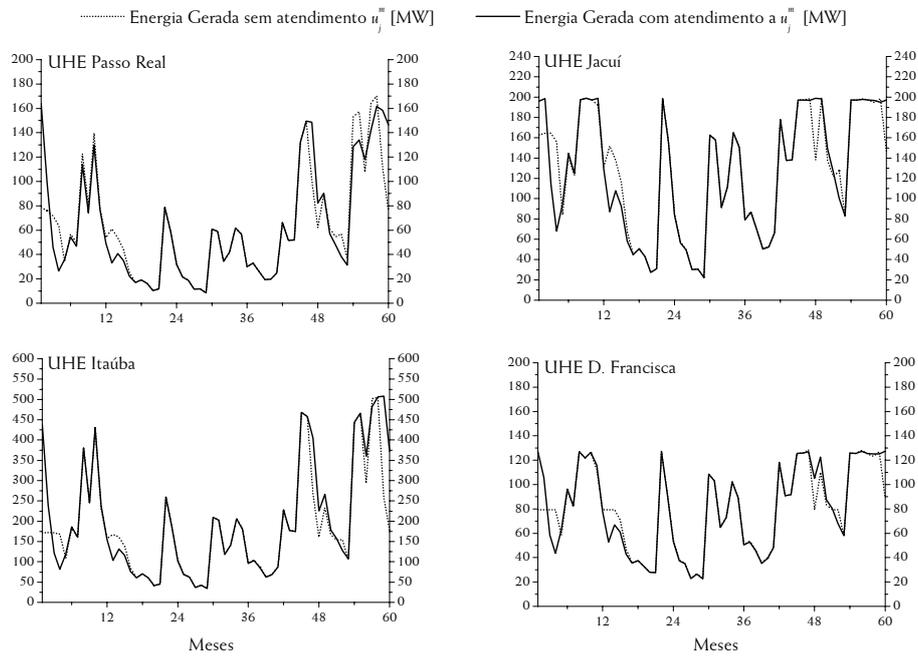


Figura 4.29 Energia produzida em cada usina hidrelétrica sob volume de averseão em 40%, série 1950-4

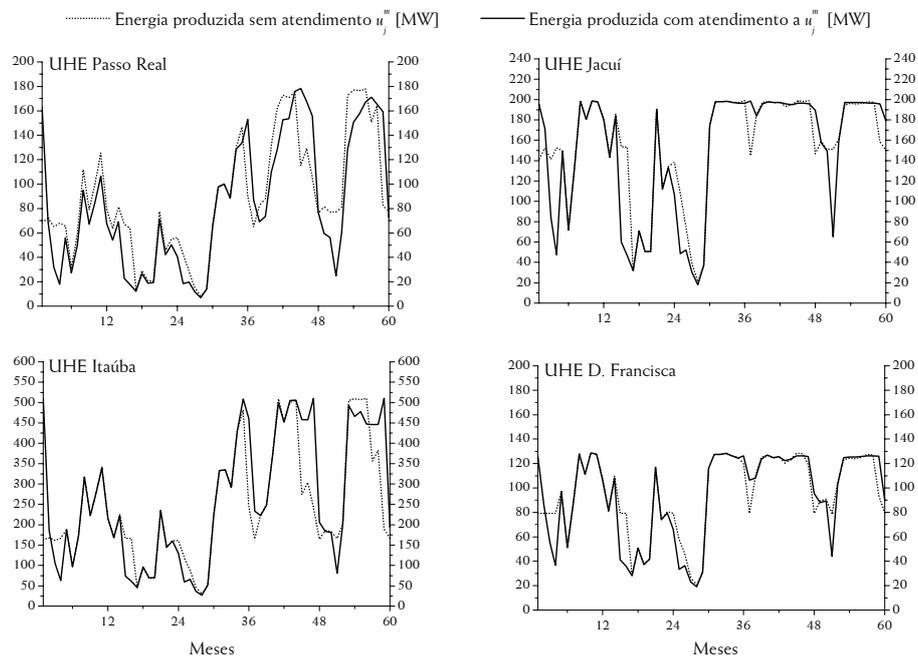


Figura 4.30 Energia produzida em cada usina hidrelétrica sob volume de averseão em 40%, série 1980-4

A fim de analisar o comportamento da operação de cada usina hidrelétrica foram gerados gráficos para os volumes turbinado, vertida e engolimento máximo para série de 1950-4 atendendo à demanda hídrica (Figura 4.31) e ignorando-a (Figura 4.32), assim como para série de 1980-4 atendendo à demanda hídrica (Figura 4.33) e ignorando-a (Figura 4.34).

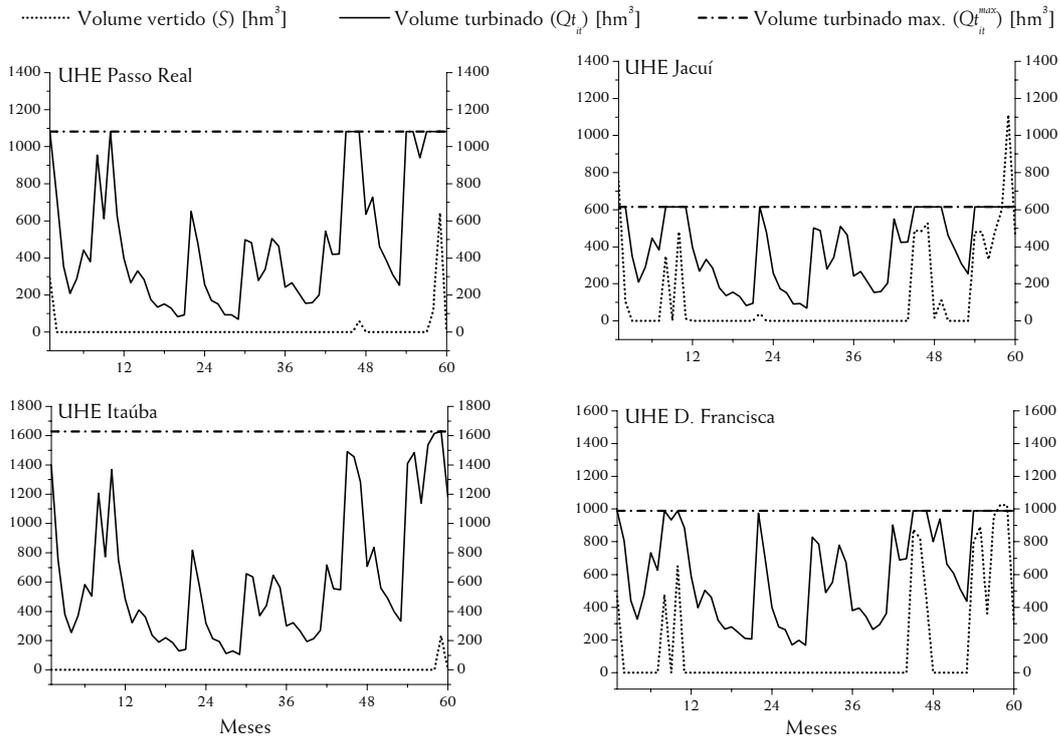


Figura 4.31 Comportamento da operação das usinas para série 1950-4 atendendo à demanda hídrica

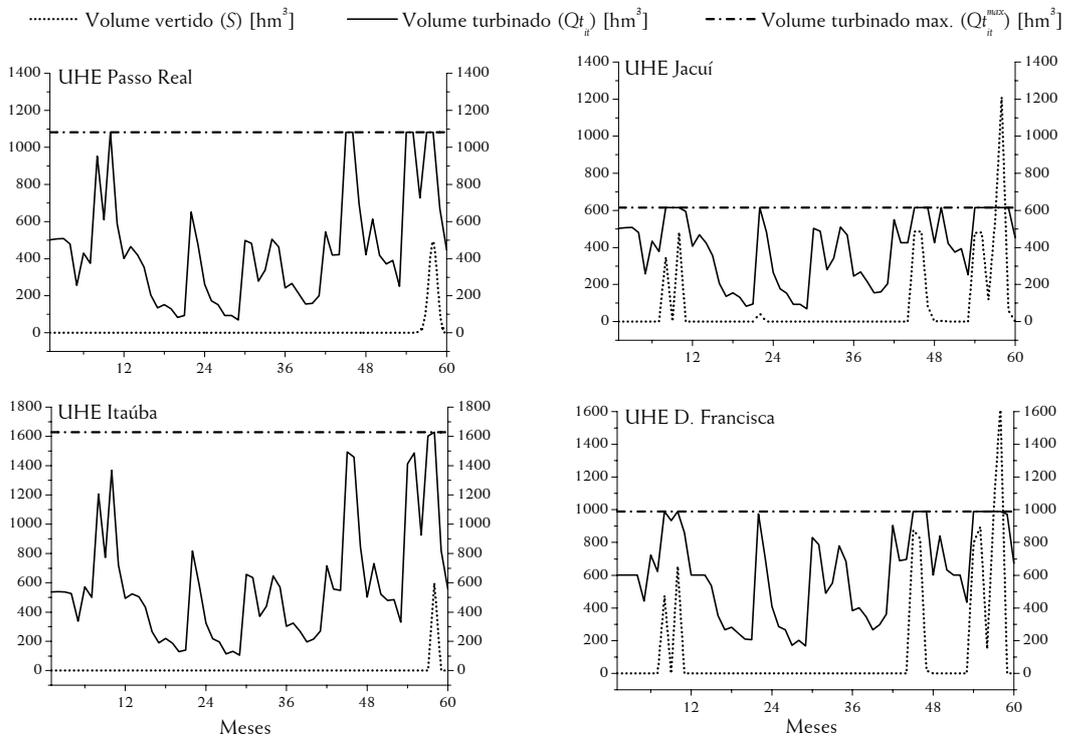


Figura 4.32 Comportamento da operação das usinas para série 1950-4 não atendendo à demanda hídrica

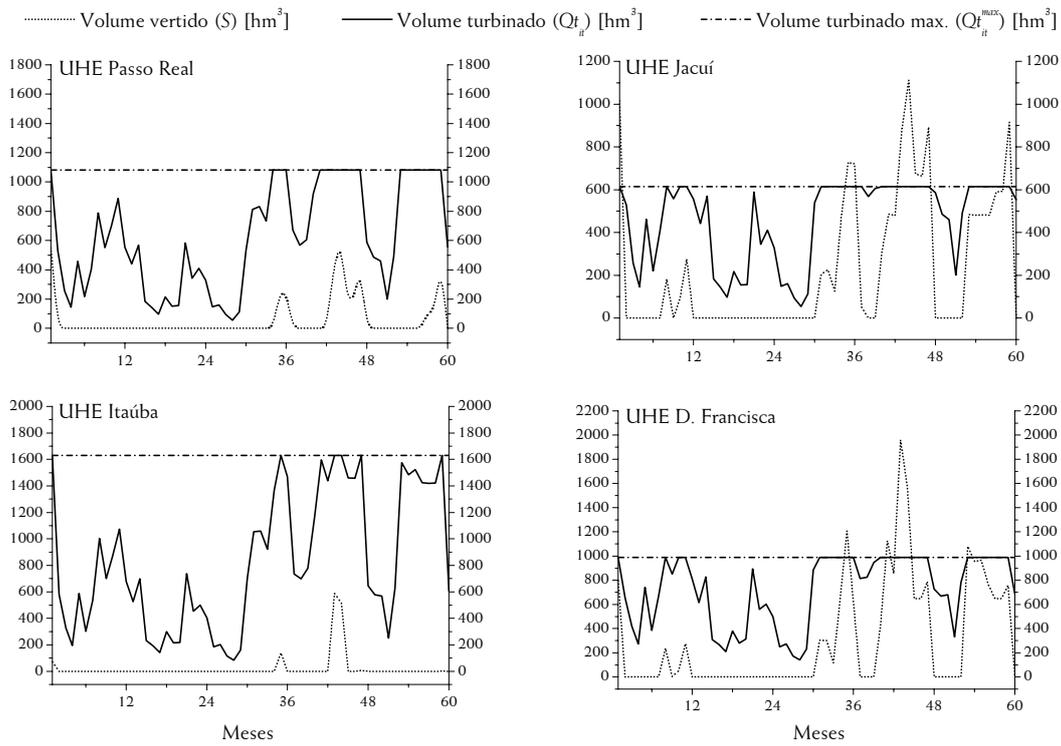


Figura 4.33 Comportamento da operação das usinas para série 1980-4 atendendo à demanda hídrica

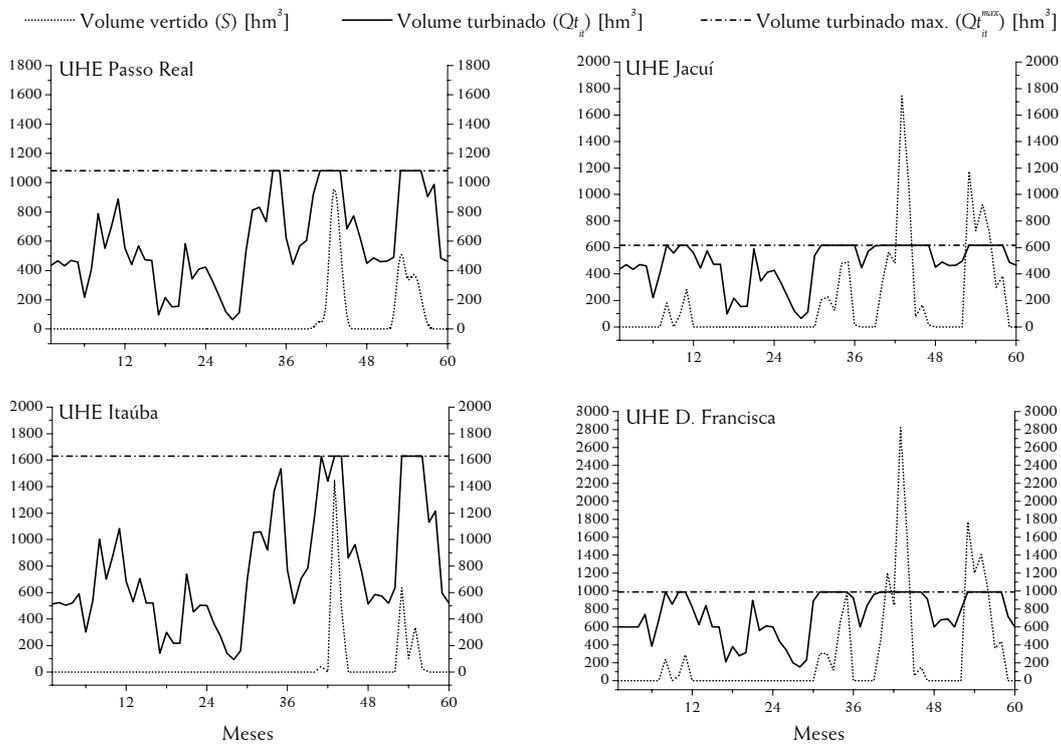


Figura 4.34 Comportamento da operação das usinas para série 1980-4 não atendendo à demanda hídrica

A operação das usinas hidrelétricas considera as restrições hidráulicas (Figura 4.4) e as restrições de vazão defluente mínima a jusante de D. Francisca (Figura 4.35) em todas as quatro séries simuladas (série 1950-4 e 1980-4 atendendo e não à demanda hídrica).

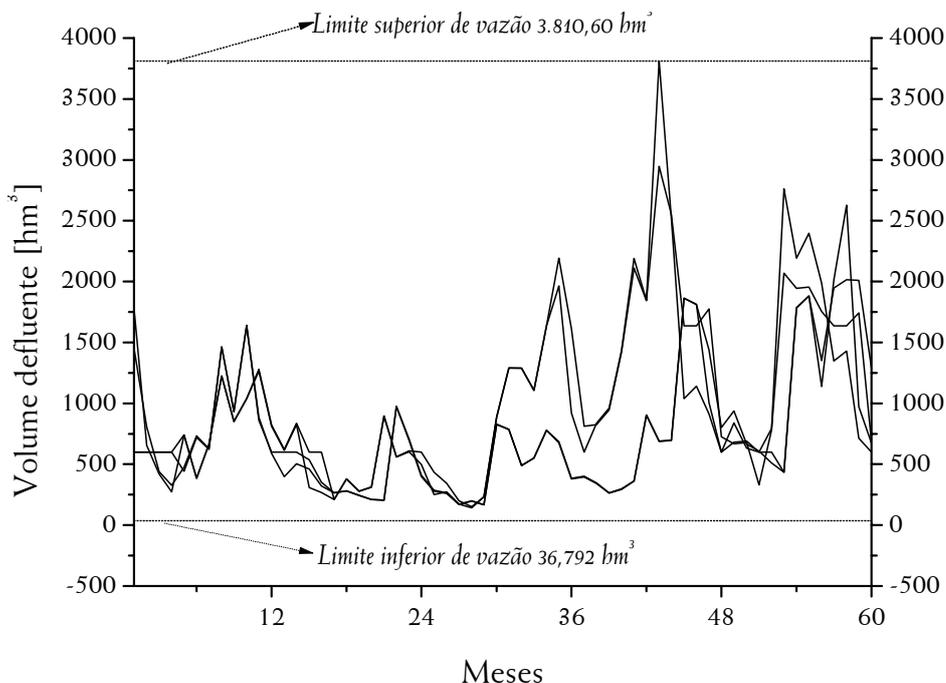


Figura 4.35 Vazão defluente da usina hidrelétrica D. Francisca sob volume de aversão em 40%

Todavia, sob a política de atendimento à demanda hídrica o volume mínimo referente (ONS, 2007a) à captação d'água para a irrigação, por exemplo, é submetido ao submodelo de *trade-off* quando em situação de não-escassez com a oferta inferior à demanda hídrica. Já, ao ignorar tal política a referida vazão é mantida. Conquanto, em ambas as situações é mantida a restrição referente à vazão defluente mínima de  $14 \frac{m^3}{s}$ , considerada como vazão sanitária de ordem ambiental (ONS, 2006, p.34).

Esse comportamento pode ser analisado para séries 1950-4 (Figura 4.36) e 1980-4 (Figura 4.37)

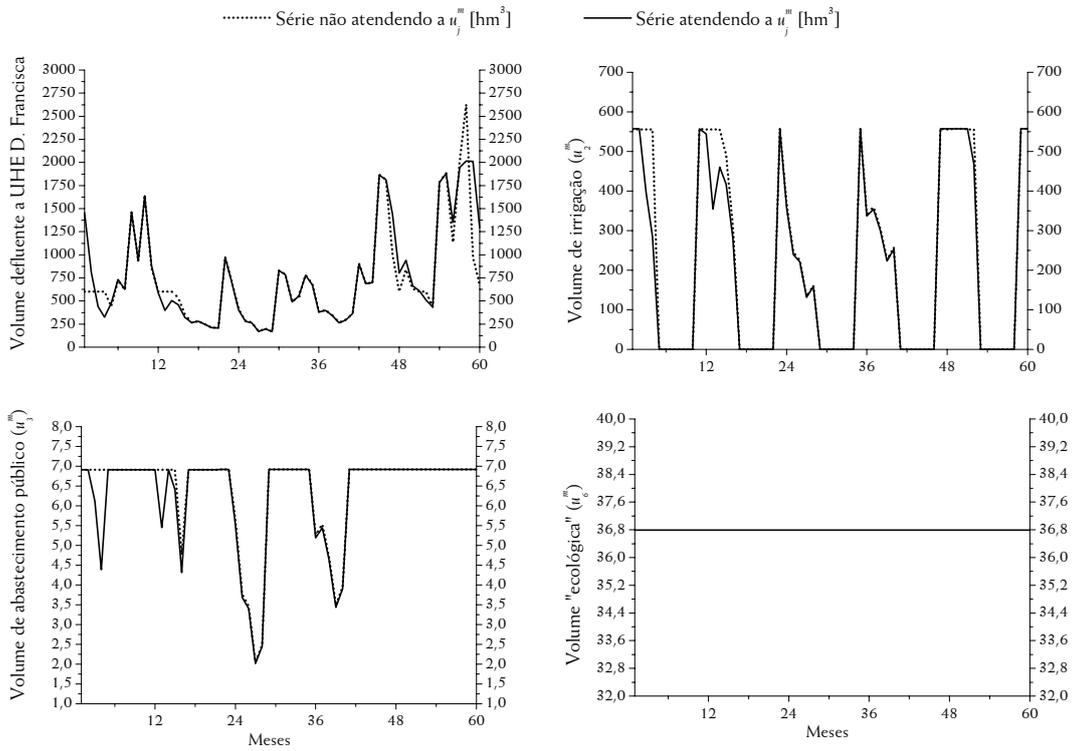


Figura 4.36 Comportamento das outorgas requeridas na série 1950-4 sob volume de aversão em 40%

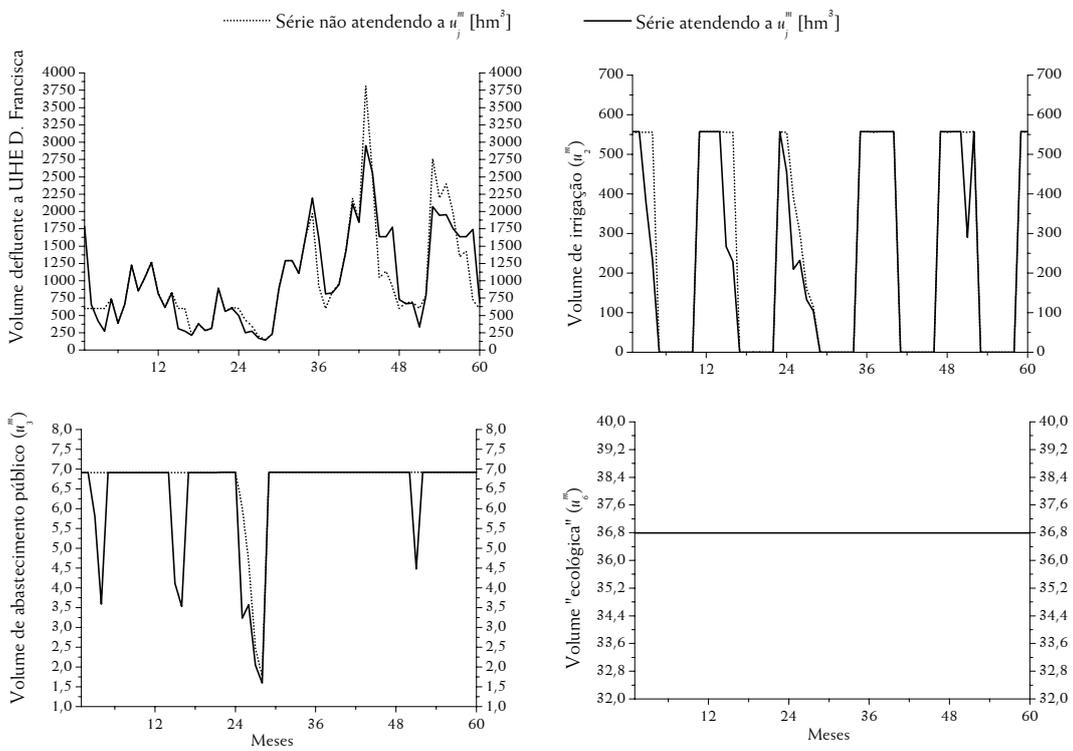


Figura 4.37 Comportamento das outorgas requeridas na série 1980-4 sob volume de aversão em 40%

### 4.3 Conclusões

Das metodologias e técnicas apresentadas no Capítulo 3 foi testada a operacionalização de algumas, tais como: critério global, de pesos e suas variações, de  $\epsilon$ -restrições, de algoritmos genéticos (MOGA), lexicográfico, programação por metas, alcançar a meta e os interativos. Dessas, aquelas que obtiveram um desempenho computacional e uma comunicação compatíveis entre o software de Dinâmica de Sistemas (PowerSim) e a planilha eletrônica programada em *Visual Basic for Applications* (VBA) foram: o método de alcançar meta para alocar a disponibilidade de recursos hídricos entre os usos múltiplos, implementado a partir do algoritmo simplex (Steuer, 1986) em *Visual Basic for Applications* (VBA); o AHP para estabelecer as importâncias relativas entre os usos múltiplos, por meio da matriz de concordância, as quais são utilizadas pelo método de alcançar meta; e o MCDA para construir a árvore de decisão que é utilizado para estruturar o problema.

A simulação demonstrou que a demanda hídrica, por exemplo, para a produção de energia elétrica, é afetada sob uma política de atendimento aos demais usos múltiplos. Todavia, a referida política é fruto dos *trade-offs* estabelecidos no modelo multicritério, segundo os valores de preferência auferidos na comparação par a par (método AHP) entre os usos múltiplos. Portanto, para diferentes *trade-offs* há uma diferente divisão do recurso hídrico disponível.

Por um lado, ao ignorar o atendimento aos usos múltiplos e liberar determinado volume d'água do reservatório de Passo Real, as usinas hidrelétricas a jusante turbinam-no de acordo com as condições e restrições operativas, produzindo o máximo de energia elétrica. Por outro lado, ao atender aos usos múltiplos entre as UHEs, a produção de energia elétrica pode ter uma redução atenuada, sob certas condições de afluências, em virtude da não-linearidade da produção de energia elétrica, Equação (4.7), quando comparada à situação anterior.

Ademais, otimizar o recurso hídrico para o setor de energia elétrica representa um custo marginal de operação reduzido para o SIN, já que a operação é integrada e centralizada. Outrossim, visto que o Estado do Rio Grande do Sul é "importador", quanto maior a produção de energia elétrica pelas UHEs da bacia do Jacuí menor é a importação de energia

pelo sistema de transmissão e, conseqüentemente, melhora a segurança e a confiabilidade de suprimento de energia elétrica ao Estado.

Todavia, otimizar o uso dos recursos hídricos apenas para produzir energia elétrica não implica maior benefício econômico para União. Nesse sentido, o modelo construído e simulado privilegia a política vigente para o setor de recursos hídricos, em que é de responsabilidade das Agências de Água e dos Comitês de Bacia definir os *trade-offs*, considerando-os ao atender às outorgas requeridas para os usos múltiplos.

Os volumes alocados, resultantes do submodelo *trade-off*, para os usos múltiplos mantiveram a ordem em valores absolutos para ambos os equacionamentos: problema (4.1) e problema (4.5). Entretanto, diferiram nos valores relativos e nas interpretações sobre as implicações e significados econômicos dos *trade-offs*.



## CAPÍTULO

# 5

## CONCLUSÕES

O CRESCIMENTO populacional e o aumento das demandas industriais e agrícolas têm gerado fortes pressões sobre os recursos hídricos. Do mesmo modo, o crescimento e o desenvolvimento econômico ampliam os usos múltiplos e as mudanças culturais fazem com que outras necessidades sejam incorporadas, resultando em impactos variados de amplitudes incertas.

O racionamento e o “apagão”, em 2001, provocaram algumas dúvidas com relação à eficácia da atual metodologia de planejamento energético em situações de escassez<sup>52</sup> e de não-atendimento hídrico<sup>53</sup>.



<sup>52</sup> Refere-se à situação em que a água é direcionada somente para dessedentar humanos e animais.

<sup>53</sup> Refere-se à situação em que o volume de água disponível em uma bacia não é o suficiente para atender a demanda outorgada.

Ademais, novos contornos da realidade sócio-política e institucional passaram a demandar maior abrangência dos objetivos da otimização, indicando o caminho para um novo paradigma. Nesse sentido, o planejamento integrado pode ser considerado como uma opção para o setor de energia elétrica.

## 5 Considerações finais

A partir da Lei nº 9.433/97, a definição sobre a prioridade de uso dos recursos hídricos, exceto em caso de escassez, está a cargo dos Comitês de Bacia Hidrográfica, sendo auxiliados tecnicamente pelas respectivas Agências de Água. As prioridades de uso e os *trade-offs*, entre cada segmento econômico usuário, ficam, desse modo, submetidos ao processo decisório e às preferências dos decisores que compõem o Comitê de Bacia, os quais

*dependem, entre outros fatores, da disponibilidade, da qualidade e da forma de tratamento e utilização de dados em escalas adequadas, ou seja, os Comitês de Bacia Hidrográfica dependem da qualidade informacional dos dados (capacidade de transmitir conhecimento) (Magalhães Jr., 2007, p. 39).*

A concorrência pelo uso da água (*trade-off*) é evidente entre os usos consuntivos, tais como irrigação, abastecimento industrial e produção de energia<sup>54</sup> - estes usos são variáveis significativas para o desenvolvimento e o crescimento econômico do Brasil.

As questões do *trade-off* água-energia e dos usos múltiplos das águas não são triviais. O planejamento e a operação do Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica (SIN) e o gerenciamento da bacia hidrográfica devem ser integrados, pois, ao privilegiar um segmento ou outro (irrigação ou produção de energia, por exemplo), poder-se-á acarretar conseqüências regionais ou nacionais danosas à economia e/ou ao meio ambiente.

Nesse sentido, o modelo proposto pretende contribuir para o planejamento integrado entre os setores de energia elétrica e de recursos hídricos, pois possibilita aos decisores explicitarem seus valores com relação ao uso dos recursos hídricos, por meio da metodologia multicritério, e analisar a repercussão desses nos cenários obtidos, por meio da Dinâmica de



<sup>54</sup> Refere-se às usinas hidrelétricas pelo uso não-consuntivo (desconsiderando a evapotranspiração que ocorre em virtude da existência do lago do reservatório) e às usinas termelétricas pelo uso consuntivo em virtude dos volumes de água requeridos para o resfriamento de sua planta.

Sistemas. Então, para cada cenário contendo um comportamento indesejado, os decisores podem rever os valores dos *trade-offs* e simular novamente a fim de averiguar o novo comportamento, sucessivamente, até o consenso. Esse processo<sup>55</sup>, portanto, desdobra-se da seguinte forma (Figura 5.1): a partir de uma simulação,  $S_i$ , obtém-se um cenário inicial,  $CE_i$ , que ao ser criticado  $CR_i$ , com vistas à modificação dos *trade-offs*, segundo a importância relativa dos decisores sobre o uso dos recursos hídricos, resulta uma nova simulação,  $S_2$ .

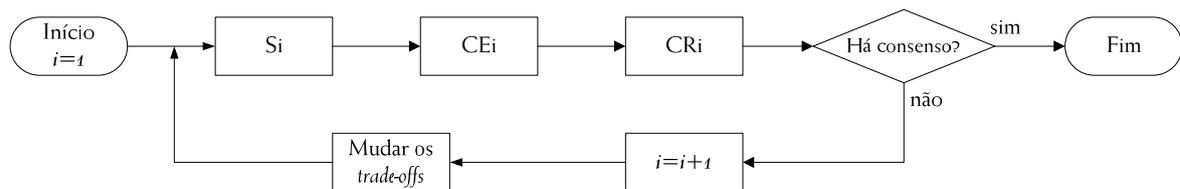


Figura 5.1 Processo de estabelecimento dos trade-offs

A credibilidade dos cenários está correlacionada ao modelo simulado e, portanto, com as variáveis de decisão consideradas e a relação entre elas. Neste, trabalho acadêmico propõe-se que a análise do modelo de simulação hidroenergético pode ser efetuada por meio dos quatro submodelos envolvidos e a seguir descritos.

#### **Submodelo de crescimento demográfico**

O modelo de crescimento demográfico, adaptado do modelo *Urban 1*, desenvolvido por Forrester (1969), considera o crescimento populacional baseada nas taxas de natalidade, de imigração e emigração, além da expectativa de vida, na Figura 4.6. No horizonte há forte tendência de estabilização populacional sob equilíbrio dinâmico, ao longo deste período, o incremento de cidadãos acarreta construção de novos lares ao mesmo tempo em que há demolição de outras edificações.

#### **Submodelo de demanda hídrica**

A demanda<sup>56</sup> varia conforme a sazonalidade dos usos múltiplos modelados, a cada trecho de bacia hidrográfica entre usinas sendo:

- as concessionárias e autorizadas de geração de energia elétrica sujeitas à outorga e à variabilidade das afluições, segundo série histórica selecionada para simulação;

<sup>55</sup> Conforme metodologia científica proposta no Capítulo 1.

<sup>56</sup> Refere-se apenas aos usos outorgados e, portanto, sujeitos as disposições da Lei nº 9433/97.

- o setor de irrigação, sujeito à outorga, à sazonalidade e à intensificação da demanda segundo taxa de crescimento<sup>57</sup> de 4% *a.a.* da área cultivada;
- o setor de abastecimento público, sujeito ao modelo de crescimento demográfico e à intensificação de 2% *a.a.* das atividades econômicas<sup>58</sup>;
- o serviço público de água e esgoto, sujeito à outorga e à intensificação da demanda segundo taxa de crescimento<sup>59</sup> de 2% *a.a.* das atividades industriais;
- o setor hidroviário e portuário, sujeito à outorga e ao calado do transporte hidroviário para escoamento da produção agro-industrial; e
- o setor de pesca e lazer, sujeito à demanda de manutenção da vida da fauna e flora, e manutenção da vazão mínima defluente.

A simulação faculta a possibilidade de atendimento da demanda hídrica por parte da usina hidrelétrica com reservatório. Desse modo, sob certas circunstâncias, a liberação do volume de água para a produção de energia elétrica, a princípio, aumenta a vazão afluyente às usinas hidrelétricas a jusante do reservatório. Entretanto, relaxar o *volume de aversão* do reservatório pode implicar em um aumento da probabilidade de *déficit* de fornecimento de energia elétrica, ou seja, deplecionar o reservatório pode elevar o risco de não atender a demanda de energia elétrica no futuro. Todavia, a depleção do mesmo acarreta perda de potencial hidráulico. Destarte, como verificada nos cenários obtidos, existe a possibilidade da produtividade da usina ser afetada negativamente, em virtude de uma vazão outorgada para usos múltiplos consuntivos entre trechos da bacia e, conseqüente, redução entre as cotas montante e jusante. Outrossim, é evidente o prejuízo hídrico à usina hidrelétrica nos casos de retirada a montante e de vazões mínimas a jusante. Em síntese, a produção de energia elétrica fica condicionada às outorgas dos usos múltiplos a montante das usinas a fio d'água e a jusante da UHE D. Francisca.

<sup>57</sup> Valor pode ser modificado no modelo de simulação, ver a interface na Figura 4.10.

<sup>58</sup> *ibidem*

<sup>59</sup> *ibidem*

### *Submodelo de trade-off*

O atendimento à demanda hídrica implica que os usos outorgados<sup>60</sup> devem-se submeter às preferências ratificadas pelos Comitês de Bacia (CBH) e pela forma de alocação do recurso hídrico. Os cenários obtidos mostram a redução do volume requerido (outorgado) para todos os usos múltiplos em cada estágio de simulação do horizonte de planejamento (60 meses) em que a demanda no trecho de bacia entre usinas é superior a oferta, sob situação de não-escassez. Nessas circunstâncias, o volume de água afluyente à usina hidrelétrica é reduzido conforme a importância relativa, determinada pelo CBH, aos demais usos múltiplos, segundo o método multicritério, incluído nesse submodelo.

### *Submodelo de geração de energia elétrica*

A produção de energia elétrica é afetada de forma não-linear pelo submodelo de *trade-off*, haja vista que a retirada d'água a montante implica em perda de recurso e a obrigatoriedade da manutenção de vazão mínima em perda da capacidade de decisão operativa. Verifica-se, para os cenários simulados uma diferença percentual com a opção de atendimento à demanda hídrica, da ordem, de 0,5% do total de energia produzida na bacia hidrográfica para os dados de entrada dispostos no Apêndice B. Entretanto, a acentuação da outorgas de usos múltiplos entre as UHEs, em virtude do crescimento da demanda hídrica, principalmente para irrigação no objeto deste estudo, acarreta aumento significativo da redução da energia produzida na bacia hidrográfica ao longo do período de simulação, por exemplo: na simulação para a série de 1970-4 se obtém uma diferença percentual de 0,77%, ou seja, 274 MW do total de energia a menos, já, para a mesma série, porém, sob um coeficiente de ajuste (Figura 4.16) em 0,7, obtém-se uma diferença percentual de 1,1%. Ademais, os cenários mostram que, sob a política de atendimento à demanda hídrica, há um *volume de aversão* do reservatório que proporciona melhor aproveitamento energético do recurso hídrico, a saber: para série 1950-4, em torno de, 40%, e para série 1980-4, aproximadamente, 20%.

Mais do que os resultados obtidos, um dos cerne deste trabalho acadêmico é a proposta, uma tentativa, de conciliar o modelo setorial de gestão dos recursos hídricos

<sup>60</sup> Isso inclui as usinas hidrelétricas.

instituído pela Lei 9433/97 com o modelo setorial de energia elétrica. Outrossim, é notório, que o setor de energia elétrica deve se preparar, revendo seus procedimentos, para este *modus operandi* das águas a fim de otimizar o seu planejamento e a sua operação.

O modelo proposto pretende contribuir no sentido de construir uma ferramenta que auxilia o planejamento integrado ao gerar cenários e propiciar a análise do comportamento da produção de energia elétrica sob diversas afluições e outorgas, considerando ou não o atendimento à demanda hídrica na bacia hidrográfica. Entre suas características pode-se citar:

- a modelagem matemática integrou aspectos quantitativos e qualitativos sob diversos pontos de vista e gerou cenários adequados providos de simulações e de soluções Pareto-relevantes;
- o reconhecimento das incertezas e da complexidade ao abordar as propagações sinérgicas dos sistemas econômicos, sociais, culturais e ambientais sobre os recursos hídricos;
- o desenvolvimento da capacidade de negociação entre os agentes econômicos envolvidos no estabelecimento dos *trade-offs*;
- a definição de objetivos e de critérios para a tomada de decisão sobre os usos dos recursos hídricos por meio de sistemas participativos de suporte à decisão;
- o planejamento dos setores de recursos hídricos e de energia elétrica de forma integrada com o planejamento político e econômico;
- a simulação dinâmica dos valores de *trade-offs* auferidos pelos Comitês de Bacia e Agências de Água no modelo multicritério, possibilitando a análise do comportamento da bacia; e
- o reconhecimento da abordagem construtivista<sup>61</sup> e da Dinâmica de Sistemas, no planejamento para os setores de energia elétrica e de recursos hídricos, pois as decisões não proverão de soluções "exatas", mas, sim, adaptativas e em etapas.



---

<sup>61</sup> O paradigma construtivista, segundo Ensslin *et al* (2001), reconhece a impossibilidade de excluírem-se do processo de decisão os aspectos subjetivos de quem decide e considera como modelo uma representação de variáveis aceita como útil pelos decisores. Tal representação é a ferramenta considerada adequada para organizar a situação e desenvolver as convicções, além de servir para comunicação. Os modelos não são aproximações da verdade, mas soluções que atendem aos objetivos e valores dos decisores.

O planejamento integrado dos recursos hídricos para o setor de energia elétrica está encaixado em circunstâncias e exige uma solução. No entanto, ela não é única e tampouco deve ser prescrita. A solução não permanece caso as circunstâncias de cada bacia e os valores da água mudem para os atores sociais envolvidos. Ademais, possui efeitos sobre outras atividades produtivas, sendo, portanto, um problema sistêmico.

Este trabalho acadêmico pretende contribuir com o desafio do planejamento em estabelecer uma relação de poder compartilhada e descentralizada, de forma a possibilitar a participação social e promover a unidade na diversidade. Planejar é reunir as condições para construir um futuro desejado e estabelecer os meios para atingí-lo, pois o presente não é apenas reflexo do passado hidrológico, mas também da co-evolução das atividades econômicas e socioambientais.

Os conflitos sobre a gestão dos recursos hídricos vão além dos interesses, em seu sentido econômico, pois estão situados em sistemas de representação e de valor das águas. Nesse sentido, este trabalho contribui, porém não tem a pretensão de esgotar o tema, ao abordar o equacionamento da estrutura institucional e da organização do espaço de gestão dos recursos hídricos capazes de atender às exigências ecológicas, jurídicas, econômicas e culturais, pois é uma tarefa essencial para o futuro do Estado-Nação do Brasil.

## **5.1 Recomendações para trabalhos futuros**

Os resultados apresentados não esgotam a questão dos usos múltiplos das águas. Porém, é necessário estimular todas as práticas necessárias e interessantes para melhorar o desempenho integrado dos setores de energia elétrica e de recursos hídricos, caracterizados pela operacionalização centralizada e prescritiva e pela gestão descentralizada e participativa, respectivamente.

Todavia, o modelo desenvolvido pode e deve ser melhorado. Como em toda modelagem, o sistema foi delimitado e pode ser ampliado, ao considerar, dentre outras coisas:

- a evapotranspiração, as perdas hidráulicas<sup>62</sup>, as unidades geradoras por usina e as suas respectivas restrições de máquina;
- o *unit commitment*<sup>63</sup> para as usinas da bacia hidrográfica;
- o atendimento às restrições operativas do sistema elétrico;
- a integração com o Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica (SIN);
- a modelagem hidrodinâmica da bacia hidrográfica;
- a estocasticidade das afluições, além da modelagem da precipitação-vazão;
- a influência do binômio solo-água no longo prazo; e
- a validação do método interativo AHP, por meio de análises de sensibilidade e de consistência.

## 5.2 Artigos publicados

Os artigos a seguir, relacionados com este trabalho, contribuíram com a discussão e melhoramentos para o modelo desenvolvido:

SICA, Everthon T.; CAMARGO, C Celso de Brasil. *Planejamento Integrado dos Recursos Hídricos para Geração de Energia Elétrica considerando Múltiplos Critérios e a Dinâmica do Capital Natural*. EletroEvolução (Rio de Janeiro), v. 50, p. 57-65, 2008.

SICA, Everthon T.; FERNANDES, Rubiara Cavalcante; CAMARGO, C Celso de Brasil. *O impacto da cobrança pelo uso dos recursos hídricos no custo da geração de energia em hidrelétricas*. In: XII Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ. Foz do Iguaçu. 2007.

SICA, Everthon T.; CAMARGO, C Celso de Brasil. *Planejamento integrado dos recursos hídricos para geração de energia elétrica considerando múltiplos critérios e a dinâmica do capital natural*. In: XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro. 2007.

SICA, Everthon T.; SOUZA, Lisandra Stein; FERNANDES, Rubiara Cavalcante. *The Environmental and Juridical Regulation of Water Use in the Brazilian Electric Power Market*. In: 41th CIGRÉ BIENAL Session, Paris: Cigré, 2006.

SICA, Everthon T.; SOUZA, Lisandra Stein; FERNANDES, Rubiara Cavalcante. *Impacto da Regulação Jurídico-Ambiental no Ambiente de Mercado do Setor Elétrico Brasileiro: os usos múltiplos das águas*. In: XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Curitiba. 2005.

<sup>62</sup> Perdas no conduto forçado, ou seja, entre a tomada d'água e a turbina.

<sup>63</sup> Seleção das unidades geradoras a serem colocadas em operação.

SICA, Everthon T.; CAMARGO, C Celso de Brasil. *Regulation and Structure Flaws of the Electrical Energy Market: of the use to the valuation of public good*. In: IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. Rio de Janeiro. SP-096. 2004.

SICA, Everthon T. ; CAMARGO, C Celso de Brasil. *The Water Use while Critical Natural Capital in the Context of the Brazilian Electric Sector*. In: IEEE/PES/T&D - Transmission and Distribution - Latin America. São Paulo: IEEE Latin America Transaction T&D Latin America. cod. 180. 2004.

SICA, Everthon T.; CAMARGO, C Celso de Brasil. *Instrumentos Econômicos de Gestão e Regulação Ambiental aplicados ao Setor Energético em Ambiente de Mercado*. In: X Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro. 2004.





## APÊNDICE



## APÊNDICE A

**O** MEIO AMBIENTE não está dissociado da economia e, muito menos, é uma variável exógena nos processos socioeconômicos. A água (como capital natural crítico) deve ter seu planejamento estruturado a fim de considerar os fatores naturais físicos, os arranjos institucionais e os padrões de interação entre usuários.

Nesse sentido, as preferências econômicas, as mudanças ambientais e a conseqüente interpretação do significado social se tornam mais difíceis quanto maior é o horizonte temporal. Porém, isso não implica interpretar a realidade por meio de uma análise imediata e puramente econômica.

Os modos de consumo dos recursos hídricos são reflexos das necessidades e, também, das distorções sociais e econômicas, ou seja, têm o perfil da estrutura social da sociedade considerada. Por exemplo, a quantidade consumida, por um cidadão europeu, é 70

vezes maior do que a consumida por um cidadão de Gana; já, o americano consome 300 vezes mais (Antunes, 2002, p. 570).

Outrossim, considerar a água como bem econômico não implica, necessariamente, conter o desperdício, haja vista que os modos de consumo são afetados mais pela construção social do que pelo valor econômico da água.

## A.1 Gestão econômica dos recursos naturais

O desafio da gestão de sistemas ambientais é regular a intensidade e a extensão da exploração dos recursos naturais. Essa regulação tem a finalidade de mediar os interesses e as necessidades entre o Estado, a sociedade civil, a economia de mercado e o meio ambiente, de servir para o estabelecimento de regras em benefício da segurança e do bem-estar da Nação, além de resguardar o capital natural dos abusos cometidos por setores que privilegiam a busca do lucro como único parâmetro de ação.

A corrente econômica neoliberal sustenta a opinião de que a propriedade privada é a única capaz de assegurar a utilização racional e duradoura do recurso. Nessa interpretação, o indivíduo tem interesse de gerir o recurso de maneira durável, pois suporta os custos da degradação. Todavia, somente o direito de propriedade não garante que a exploração do recurso seja racional tampouco sem externalidades negativas (Prestre, 200, p. 52).

A obra de Garret Hardin (1968), "A Tragédia dos Bens Comuns",<sup>64</sup> apresenta o problema da gestão dos bens coletivos, que, de certa forma, pode ser uma antítese do pensamento preconizado por Adam Smith em "A Riqueza das Nações", caso aplicado aos



<sup>64</sup> A Tragédia dos Bens Comuns desenrola-se da seguinte forma: imagine um pasto aberto a todos os criadores de gado de uma aldeia. Diante da maximização dos interesses individuais (tese preconizada por Adam Smith), cada criador terá a tendência de fazer pastar ali o maior número possível de animais, a fim de maximizar seus lucros. Então, o criador, explicitamente ou implicitamente, consciente ou não, pergunta-se: Qual a vantagem para mim de acrescentar mais um animal ao meu rebanho? Sua resposta dependerá de dois fatores: (i) o lucro de cada criador depende do custo marginal de cada animal e da distribuição dos benefícios. Caso, cada criador receba o benefício *integral* da venda do animal adicional, então o benefício estará perto de um valor  $x$ , digamos 1; (ii) o custo marginal é função do risco do excesso de animais pastando, ou seja, a devastação adicional do pasto criada por um animal a mais. Os efeitos desse risco são compartilhados por todos os criadores de gado da aldeia. Então, os custos associados para cada animal adicional será uma fração ( $\frac{1}{x}$ ) do benefício por cada animal adicional. Portanto, caso cada criador tenha esse comportamento "racional" e adicione um animal, e mais outro, e mais ... o pasto será desgastado até o ponto em que todos ficarão incapazes de alimentar seus animais e acabarão arruinados.

recursos naturais de natureza coletiva. Adam Smith afirma que a busca individual da riqueza conduzirá à riqueza coletiva, graças ao mercado que funciona por meio da “mão invisível”. Já, Garret Hardin afirma que a maximização individual da riqueza acarreta ruína a todos, quando os recursos são limitados. Dessa forma, o melhor para todos e a sustentabilidade do recurso natural não podem ser alcançados senão por meio da ação coletiva.

### A.1.1 Valor econômico das águas

A tendência de atribuir preço e de mercantilização da água é uma conseqüência da visão de mundo decorrente do Consenso de Washington<sup>65</sup>. Nessa tendência, a água possui valor econômico, pois é escassa, devendo ser atribuído um preço com base nos custos de recuperação e na disposição<sup>66</sup> a pagar dos usuários. O argumento principal é que, ao atribuir valor econômico, os usuários seriam incentivados a conservar a água, utilizando-a racionalmente.

No entanto, é necessário discernir entre mercado da água e de serviço da água. Para a água não há substituíbilidade, já, para o serviço de abastecimento, transporte ou purificação pode existir.

Outrossim, deve-se advertir sobre o fascínio que o livre mercado exerce como meio eficiente para alocação dos recursos. “Muitas vezes se observa a falência do mercado para atingir a eficiência social e ambiental e, a longo prazo, até mesmo a eficiência econômica demonstrada pela teoria econômica neoclássica” (Lanna, 2002b, p. 558)

Atribuir preço à água não implica, necessariamente, conservação dos recursos hídricos, uma vez que o usuário compra o direito de usar a água conforme seus valores e racionalidade. O valor econômico atribuído pode exacerbar as desigualdades ao acesso a esse recurso indispensável, além de submeter usuários à escolha de usos que outrora não eram mutuamente exclusivos sob situação de não-escassez.

CS

<sup>65</sup> O “Consenso de Washington” preza por um modelo econômico calcado na convicção que as economias de mercado liberais constituem a única opção, em que não há necessidade do planejamento, o mercado determinar o futuro – a água é uma necessidade humana e não um direito humano.

<sup>66</sup> Antonio Eduardo Lanna (2002b, p. 547) afirma que a disposição a pagar pela água “é o valor limite que um usuário pagaria por uma unidade adicional”.

A discrepância entre os benefícios em ambiente de mercado não é somente em quantidade mas também em qualidade e, portanto, não comparáveis sob uma relação financeira direta (Sica e Camargo, 2004b).

### A.1.1.1 Paradoxo das externalidades

A internalização dos custos ambientais tem uma relação inversa com o lucro. A noção de externalidade é resultante da incapacidade regulatória do mercado, ou seja, é uma manifestação da ineficiência na alocação dos recursos, ver Figura A.1.

Ao maximizar a utilização do recurso, inevitavelmente se acaba por aumentar os resíduos e a degradação dos recursos naturais. Porém, os recursos naturais são finitos, e diante da lógica de maximização da utilidade podem se tornar escassos. O princípio da maximização da utilidade foi concebido antes do advento das preocupações com o meio ambiente.

Alguns recursos e serviços ambientais, como o solo, podem ser geridos com razoável eficiência econômica pela propriedade privada. Os proprietários do solo atendem a programas de conservação, pois as conseqüências do não-atendimento recaem sobre eles. Por outro lado, ele não ocorre com os recursos hídricos, uma vez que a água é um fluído e móvel.

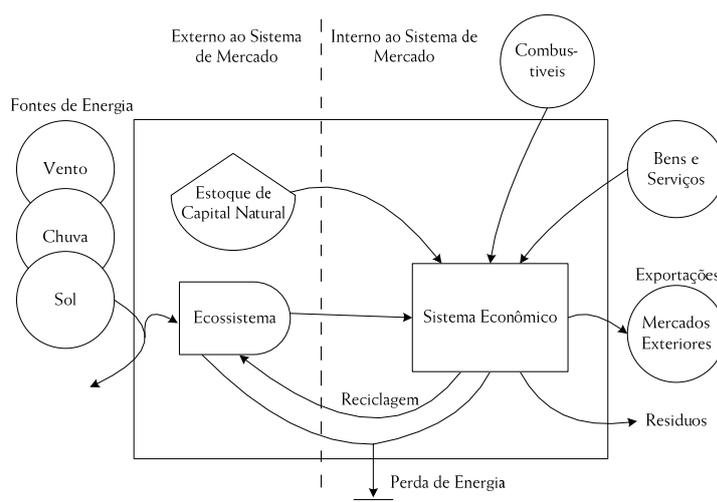


Figura A.1 Fluxo energético entre a economia e o meio ambiente, adaptado de Pillet (1993, p. 272)

Conquanto, caso a água seja propriedade privada, a poluição não ocorreria, haja vista que o proprietário exigiria de seus causadores o ressarcimento. Entretanto, há varias

dificuldades e impedimentos evidentes para o sucesso desta interpretação. Lanna (2002a, p. 750) afirma que a poluição só é visível em níveis elevados e a quantificação dessa poluição exige amostras freqüentes e exames laboratoriais caros.

A identificação dos poluidores e a regulação do recurso exigem um agente regulador forte, eficaz, isento (não cooptado) e permanente. As mesmas características são exigidas do agente jurídico que deve definir a responsabilidade legal (civil e penal) das partes envolvidas. Portanto, a complexidade, as externalidades e a crescente utilização dos recursos hídricos acentuam a incompatibilidade da gestão das águas com a sua propriedade privada (Lanna, 2002a, p. 749).

### A.1.1.2 Uso de bens e serviços ambientais

Para a maior parte dos “ativos naturais”, que se caracterizam pelo uso múltiplo, não é possível encontrar um substituto que possa preencher as funções econômicas, recreativas e biológicas; a água é um bom exemplo.

O sistema econômico é um sistema aberto e dependente dos recursos naturais, do trabalho e da tecnologia (Figura A.2). A característica da transversalidade dos recursos naturais aos demais setores econômicos é notória.

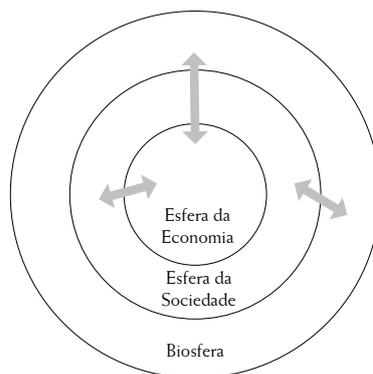


Figura A.2 Interdependência entre a economia, sociedade e meio ambiente, adaptado de Passet (1979)

A regulação e, conseqüentemente, o mercado não são eficientes à sustentabilidade de uso dos recursos ambientais quando não há nexos causais entre o equilíbrio das relações de troca no mercado e o equilíbrio ecológico, segundo, Montibeller-filho (2001) e Faucheux e Noel (1995) (Figura A.3).

Nesse sentido, a regulação do uso do capital natural hídrico deve negar tanto a abordagem teórica que proclama uma hipótese de substituíbilidade ilimitada no interior do

estoque de capital natural, quanto à abordagem de econômica estacionária. Pois, nessas duas a manutenção do estoque, no tempo, não é uma condição necessária nem suficiente para assegurar a sustentabilidade do uso e do desenvolvimento.

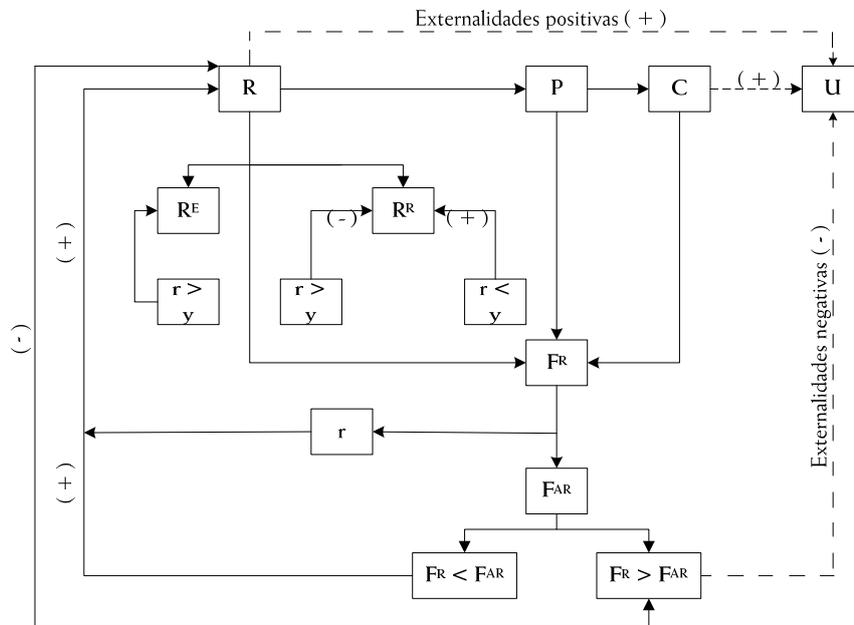


Figura A.3 Esquema circular das relações economia-meio ambiente (Sica e Camargo, 2004a)

A Figura A.3, adaptada de Faucheux e Noël (1995, p. 61), ilustra os laços entre e economia e meio ambiente, em que  $y$ ,  $r$ ,  $R$ ,  $C$  e  $P$  representam, respectivamente, a taxa de renovação do recurso, a reciclagem, os recursos, os bens de consumo e a produção;  $R_R$  é o fluxo de recursos renováveis;  $R_E$  é o fluxo de recursos exauríveis;  $h$  é a taxa de exploração do recurso ambiental. Os fluxos materiais são apresentados em traços contínuos, e os fluxos de utilidade em pontilhados. Observa-se que, caso o fluxo de resíduos,  $F_R$ , seja maior do que a capacidade de absorção do meio ambiente,  $F_{AR}$ , a utilidade,  $U$ , e o recurso natural,  $R$ , serão afetados negativamente.

## A.1.2 Economia ecológica

A economia ecológica tem como objetivo a representação das conexões sistêmicas entre o homem e suas atividades em relação ao meio ambiente (Pillet, 1993 p. 138). Além de procurar entender como os ecossistemas operam e se comportam, o que é de suma importância para a economia e o planejamento integrado de recursos.

Para o planejamento energético, o funcionamento do ecossistema em si não é tão importante quanto as relações entre o setor de energia elétrica, a economia, a sociedade e o meio ambiente, em especial os recursos hídricos. A visão de ecossistema que interessa à economia não é a perspectiva das espécies, e, sim, os componentes abióticos, ou seja, a matéria e a energia que determinam a organização e a hierarquia do sistema.

A economia ecológica considera limites ao crescimento baseados na escassez, na capacidade de suporte e absorção de resíduos e na substituibilidade limitada entre o capital natural e o progresso tecnológico.

Essa proposta econômico-ecológica não proíbe a exploração do recurso, mas o limita. A exploração não é contínua até o esgotamento físico ou econômico; haverá um custo de oportunidade crescente, em razão do investimento necessário, em capital natural, e dos rendimentos derivados da diminuição do estoque de recursos naturais (Sica e Camargo, 2004a).

O avanço tecnológico e o acúmulo de capital monetário não são substitutos perfeitos para o capital natural, caso fossem, não seria necessário considerar a escassez de água e o aviltamento de ecossistemas, pois, o capital tecnológico e o capital monetário seriam capazes de substituir plenamente o capital natural (Merico, 1996, p. 23-41; Faucheux e Noel, 1995, p. 359-79). Ou seja, a degradação do capital natural, no presente, não comprometeria o bem-estar futuro, uma vez que o avanço tecnológico implicaria menos uso do capital natural.

Consoante com a necessidade de integrar a economia, a sociedade e a ecologia um novo método de modelagem foi introduzido por Howard T. Odum (1983; 1996), além de um novo conceito de medida sistêmica: a eMergia, cuja unidade é o Joule-solar (seJ).

A eMergia, ver Equação (A.1), é definida em função da quantidade e qualidade (transformidade) de energia agregada a um produto ou serviço desde o sol. Quanto mais transformações energéticas forem necessárias para se obter um produto ou serviço maior é a transformidade (Figura A.4). A avaliação energética é obtida pela variação da entropia, por unidade de tempo, segundo os fluxos de energia e matéria existentes entre o sistema e o meio ambiente (Prigogine e Stengers, 1979, p.326-7).

$$eMergia[seJ] = energia[J] \times transformidade[se] \quad (A.1)$$

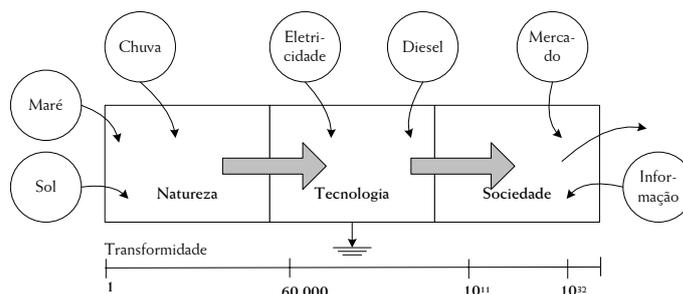


Figura A.4 Diminuição da quantidade energética disponível e aumento da taxa de qualidade energética (Merico, 1996)

O modelo é desenvolvido segundo simbologia disposta por Odum (1983), e as quantidades, as taxas e os fluxos são dados que possam ser traduzidos para unidades energéticas, por exemplo, o modelo resumido da água na bacia hidrográfica de uma lagoa (Figura A.5). A estrutura do modelo, os componentes (símbolos) e os fluxos (funções dinâmicas) são dispostos segundo sua transformabilidade, conforme Figura A.4.

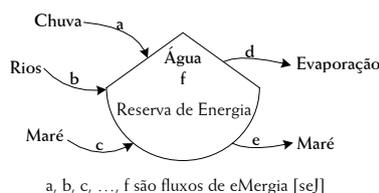


Figura A.5 Modelo energético resumido da água na bacia hidrográfica de uma lagoa (Odum, 2000)

### A.1.3 Planejamento e Mercado

O desenvolvimento da economia moderna apóia-se, simultaneamente, nos mecanismos de mercado e nas Administrações Públicas. Destarte, a tomada de decisão é acentuada pela predileção de uma ou de outra. Porém, tanto nos mecanismos de mercado quanto nas Administrações Públicas existem certos fundamentos e pontos de referência que devem ser analisados.

O Banco Mundial considera que o papel do Estado deve ser apenas o de estabelecer as regras do jogo e promover os mecanismos de mercado, não mais a gestão e o planejamento do setor de recursos hídricos. Tanto que o Conselho Mundial da Água no Fórum de 2000, em Haia, promoveu um documento fundamentado no livre comércio e no planejamento pelas leis de mercado à satisfação do consumidor (Petrella, 2002, p. 51). Desta forma, os recursos hídricos não estariam submetidos ao *welfare-state*, mas sim ao Consenso de Washington.

Por outro lado, o comércio informal de água sempre existiu entre agricultores e comunidades (pequenas). Contudo, os princípios que regem esse comércio são baseados na herança comum da água – água compartilhada.

O mercado implica transformação do espaço econômico no qual as águas, além do valor de uso, passam a ter um valor de troca. Então, o agente econômico poderá usufruir da renda que o capital natural pode gerar de forma produtiva ou especulativa.

Por um lado, a regulamentação dos recursos naturais, pelos mecanismos de mercado, não deve ser de outra forma, senão parcial. Nesse sentido, Godard (2002, p. 217-20) expõem duas importantes limitações. A primeira se refere à eficiência dos modos de gestão que são adotados, haja vista que os agentes econômicos não ponderam na tomada de decisão sobre grande parte dos efeitos sinérgicos<sup>67</sup> do capital natural, pois eles não são objetos nos contratos de troca. A segunda limitação se refere à incapacidade de o mercado gerar uma informação que os agentes econômicos já não possuam.

Por outro lado, os principais argumentos delineados pelos apologistas da mercantilização da água<sup>68</sup> são:

- o enorme desperdício no uso e no gerenciamento da água, dá-se em razão do preço relativamente baixo; portanto a água deve ser tratada como bem econômico; e
- o gerenciamento da água, sob a era da escassez, exige preços reais que devem ser estabelecidos pela dinâmica de oferta e procura, regida pelas leis do livre mercado.

O encadeamento desses argumentos é sugerido como dogma na conversão da água em *commodity*, sendo a melhor garantia contra os conflitos - "a água como bem econômico será um fator de paz" (Petrella, 2002, p. 77-8).

Mais que um julgamento de valor, considerar a água como necessidade implica que o setor privado, por meio do mercado, pode gerir os recursos hídricos. Do mesmo modo, outros bens e serviços dos quais se tem necessidade, como, por exemplo, o aparelho celular e o serviço de telefonia. Por sua vez, ao considerar a água como direito fundamental, o Estado deve garantir o acesso a ela.

CS

<sup>67</sup> A combinação de ações determinadas em função das racionalidades locais, portanto fragmentadas, podem implicar efeitos globais de transformação do ecossistema que não são considerados pelos mecanismos de troca.

<sup>68</sup> A Revista *Fortune*, em maio de 2000, tinha como matéria, o seguinte: "A água promete ser para o século XXI o que o petróleo foi para o século XX: o artigo precioso que determina a riqueza das nações".

A água é mais que um bem econômico<sup>69</sup>, a idéia que as leis de mercado têm em seu âmago e as conseqüências adjacentes a seus efeitos, a capacidade de resolução autônoma é reducionista. Essa interpretação é baseada numa escolha ideológica que prioriza o valor econômico e a liberdade individual. Desse modo, apenas a sujeição às regras de mercado e à sinalização aos usuários dos recursos hídricos, por meio de preços, não são suficientes (mesmo que necessárias) para adequação ao uso racional dos modos de produção e de consumo. No mercado de recursos naturais e serviços ambientais deve-se atentar às flutuações do preço da mercadoria, para que o investimento especulativo não suplante por longos períodos o investimento produtivo<sup>70</sup>.

Qualquer alternativa de gestão e de planejamento que seja analisada com respeito ao desenvolvimento sustentado é confrontada com a incerteza, a irreversibilidade e a complexidade. O sistema econômico tem *inputs* de energia e de matéria-prima do meio ambiente, porém afeta o meio ambiente ao gerar resíduos, mudando o comportamento do sistema (Figura A.6). Nesse sentido, Daly (1989) afirma que

*não se deve permitir que os preços de mercado decidam as taxas de fluxo de matéria e energia – através da fronteira que separa a economia do ecossistema – nem a distribuição dos recursos entre pessoas diferentes (gerações diferentes). A primeira é uma decisão ecológica, a segunda uma decisão ética. É natural que as decisões influirão e devem influir nos preços de mercado, mas o importante é que estas decisões ecológicas e éticas determinem os preços, não sejam determinadas por eles.*



<sup>69</sup> Jean-Paul Besset afirma, no *Le Monde*, que a questão da água é crucial para o nosso sistema econômico, nossas reservas energéticas, nossos modos de produção, nossos meios de transporte, nossa organização coletiva, nossos comportamentos sociais e nosso modo de vida individual (Besset, 2003).

<sup>70</sup> Em certas circunstâncias, os objetivos da auto-reprodução do capital e da produção podem coincidir no sentido positivo e, quando isso ocorre, o sistema de mercado pode cumprir a sua função social. Em oposição, a produção e a auto-reprodução do capital podem demonstrar uma projeção preocupante para o futuro. O sistema de mercado pode, segundo Mészáros (2002, p. 699), apresentar barreiras para a produção, as quais hoje são suplantadas pelo próprio capital de maneira que asseguram inevitavelmente apenas a própria reprodução do capital (fato verificado em extensão contínua e constante crescimento). Isso costuma ser uma auto-reprodução destrutiva, em oposição antagônica à produção genuína que internaliza os custos externos, redirecionando o fluxo de capital segundo as transformações orgânicas resultantes. Há, então, a necessidade que o sistema de mercado absorva, por meio de um planejamento coerente com a realidade do capital natural, instrumentos para prover um sistema de proteção e sustentabilidade dos recursos naturais potencialmente energéticos.

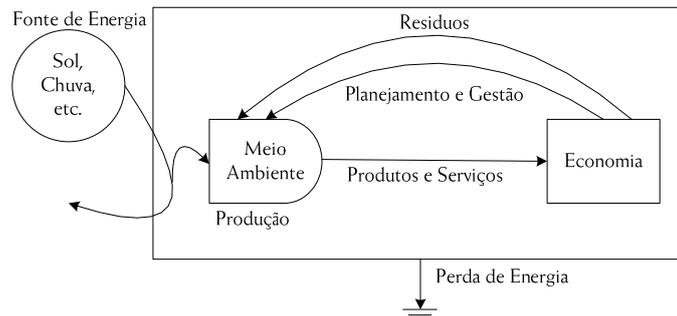


Figura A.6 Modelo simplificado de fluxo de energia/matéria-prima entre economia e meio ambiente, baseado na metodologia desenvolvida por Howard T. Odum (1983)

### A.1.3.1 Gestão pela esfera privada ou pública

Muitos países deram início às privatizações, ao final da década de 1980, pois “o privado é considerado sinônimo de eficiente, lucrativo, transparente, flexível, adaptável e inovador” (Petrella, 2002, p. 33). As fortes pressões sobre a opinião pública, mídia e demais meios corroboraram para disseminar a água como ativo econômico cujo valor, propriedade e uso devem ser submetidos às leis de mercado.

Um dos países precursores do programa de privatização dos setores de energia elétrica e de recursos hídricos foi a Inglaterra. A venda dos bens comuns, considerados como “ativos públicos”, era a ordem maior do programa liberal do Partido Conservador, no poder de 1979 até 1997, sendo os dez primeiros anos denominados de “Era Thatcher” (Rosa *et al*, 1998, p. 23).

Na maioria dos casos, a privatização é financiada pelo Estado. De acordo com o Banco Mundial, o suporte financeiro inclui desde contribuições em dinheiro a subsídios sob a forma de verbas não restituíveis, de isenção de impostos e reembolso fiscal sobre os custos de construção e operação.

Existem três formas de privatização dos sistemas de águas:

- pela venda completa dos sistemas de fornecimento e de tratamento de água, assim como aconteceu na Inglaterra;

- pela concessão ou *lease* (arrendamento) às corporações<sup>71</sup> de água, no qual essas se comprometem com o fornecimento do serviço, com o custo de operação e de manutenção do sistema; e
- pela terceirização da administração dos serviços de águas por meio de taxa administrativas, neste caso a corporação não pode assumir a coleta de receitas.

A segunda forma é a mais comum, freqüentemente denominada de Parcerias Público-Privada (PPP) foi desenvolvida na França. Após a privatização, o controle público sobre o objeto diminui consideravelmente..

Os mecanismos de regulação e planejamento advindos das Administrações Públicas “demonstram freqüentemente sua incapacidade em assegurar a dimensão do longo prazo de forma aceitável à população” (Godard, 2002, p. 222). Organizar e estruturar a cooperação entre as várias atividades produtivas num mesmo espaço de planejamento e gestão são grandes desafios.

Sob um enfoque puramente liberal, a Administração Pública é alvo e sinônimo de ineficiência, lentidão e obscuridade. Esta interpretação procura relativizar as deficiências do mercado e preconiza o Estado mínimo<sup>72</sup>.

O planejamento não integrado e a formulação de políticas públicas centralizadoras podem ocasionar inconvenientes. Esses foram descritos por Godard (2002, p. 227-8) num breve relato sobre a gênese do movimento de descentralização da gestão dos recursos hídricos, a saber:

- as decisões freqüentemente não são adaptadas às condições locais em função do desconhecimento das especificidades;



<sup>71</sup> O objetivo de qualquer corporação privada é maximizar o lucro, isto implica encorajar o aumento de consumo. Dessa forma, não importa o quão responsável é uma corporação privada em seu negócio, simplesmente não foi concebida para servir ao interesse público e nem tão pouco para gerir uma mercadoria de forma sustentável com planos de longo prazo (sustentabilidade do recurso natural, discernindo entre a dinâmica econômica e as características dos recursos naturais renováveis).

<sup>72</sup> Concepção de Estado com poderes e funções limitadas, que intervém o menos possível na esfera de ação dos indivíduos de forma que a expansão e o desenvolvimento de um indivíduo abastado possam ocorrer mesmo em detrimento do menos abastado (Bobbio, 1994, p. 1-40).

- a tomada de decisão centralizada submete os espaços locais às pressões e ações em outro nível, implicando perda do poder de decisão local e conseqüentemente revigora o desinteresse e o descaso com relação ao destino dos ambientes locais; e
- a centralização do poder decisório e financeiro faz com que os agentes econômicos locais se tornem “clientes” da administração central.

A gestão pública administrou, por muito tempo, este recurso renovável de maneira não integrada. Isso é decorrente, em boa parte, dos vícios das estruturas institucionais organizadas por setores da economia. Desse modo, o setor de energia elétrica implementou as usinas hidrelétricas, o setor de agricultura implementou os projetos de irrigação e assim por diante (Sica, Souza e Fernandes, 2005).

Novos arranjos institucionais de comando e controle (regulação e planejamento) para gestão integrada entre os setores de energia elétrica e de recursos hídricos são necessários. Nesse sentido, enumeram-se as seguintes constatações:

- a necessidade de incorporar a dimensão do longo prazo, ou seja, fatores intervenientes como os sociais, ambientais e econômicos;
- a interdependência entre fatores naturais, econômicos e sociais;
- a multiplicidade de usos potenciais do mesmo recurso; e
- as limitações do cálculo econômico padrão (mercantil) para o planejamento e gestão no longo prazo.

Nesse sentido, o planejamento energético não deve ignorar seus efeitos em outras atividades econômicas. Os modos de produção e de consumo de energia elétrica ultrapassam a questão do uso de bens ambientais escassos, pois não é apenas uma ineficiência de alocação dentro de um sistema de mercado, mas da própria natureza do sistema.



## APÊNDICE

# B

## APÊNDICE B

**E**STE apêndice aborda os dados tabulados em planilha eletrônica, que são utilizados para transferência de dados com o software de Dinâmica de Sistemas.

## B.1 Tabulação dos dados de entrada

Tabela 5.1 *Vazões incrementais – aflúncia histórica de 1950 a 1954*

$I_{10}$	$I_{21}$	$I_{32}$	$I_{43}$	Discretização
121,9901	1,1868	33,7401	64,0893	1
100,5210	0,0000	31,4421	62,1334	2
119,3621	0,5934	28,8232	63,8350	3
121,5888	1,4016	45,3768	74,2848	4
255,5942	2,3737	80,4507	104,9505	5
429,6780	4,1172	137,3568	150,4968	6
375,8888	3,5605	120,4641	122,6683	7
952,3533	10,0034	244,3192	256,1876	8
610,8348	6,5700	155,2272	161,7972	9
1331,9721	13,1400	273,9054	271,4470	10
587,8836	6,0444	125,9688	139,8096	11
383,3489	3,9844	87,8261	107,4937	12
261,5284	2,7128	56,0357	76,4663	13
328,8754	3,2850	80,5294	96,2974	14
283,3154	3,0519	77,9923	100,9661	15
176,8644	2,6280	58,6920	86,8116	16
135,7235	1,6955	52,3057	76,6359	17
153,0372	2,2776	63,9480	61,6704	18
129,9588	1,4412	56,3748	57,0530	19
83,7569	0,0000	45,3542	80,3659	20
93,8196	0,7008	46,0776	65,8752	21
650,8963	6,8667	160,0537	158,2734	22
477,2448	4,6428	104,2440	119,0484	23
256,6963	2,6280	61,3765	84,5199	24
171,4982	2,6280	40,5221	69,0062	25
151,7897	1,1781	42,3199	69,5967	26
92,9125	0,0000	21,0240	58,1551	27
93,1188	0,5256	38,4564	68,6784	28
68,7519	0,0848	37,8941	61,3765	29
497,5680	4,9932	154,8768	172,3092	30
482,7890	4,8321	147,8462	151,0676	31
277,8898	2,6280	89,5215	119,8707	32
339,7128	3,5040	97,6740	111,8652	33
504,7455	5,6799	135,7235	133,7737	34
462,9660	4,6428	101,4408	115,9824	35
242,1151	2,7128	58,0703	81,8071	36
265,5975	2,7128	56,7987	76,8902	37
211,4601	2,4403	54,4371	78,6523	38
154,9672	0,8477	39,2505	72,1428	39
158,9064	2,6280	53,6988	82,8696	40
200,9148	2,7128	66,8868	92,0648	41
544,4340	5,5188	167,0532	187,4640	42
420,0561	4,4930	131,1457	134,5366	43
421,8364	4,2387	122,6683	148,8635	44
1730,1876	18,2208	391,7472	372,2124	45
1835,1917	17,4635	358,2557	354,7800	46
692,7408	7,0956	146,8176	159,4320	47
331,2975	3,4757	76,9750	97,8294	48
613,5108	5,4255	113,9365	107,3241	49
418,4151	3,8481	100,0517	110,1883	50
370,5480	3,4757	104,8657	121,2271	51
303,2712	3,3288	91,1040	116,2452	52
249,9991	2,7128	78,6705	103,5941	53
1121,5428	11,1252	318,6012	372,8256	54
1411,0665	13,6486	390,4699	395,8107	55
727,1083	7,2058	192,6917	211,0030	56
1934,6460	20,2356	435,2844	410,4060	57
2100,0263	19,4981	403,1861	398,6083	58
669,7896	6,5700	142,5252	155,1396	59
448,5403	4,5778	101,5595	119,1925	60

Tabela 5.2 *Vazões incrementais – afluência histórica de 1980 a 1984*

$I_{10}$	$I_{21}$	$I_{32}$	$I_{43}$	Discretização
383,6032	3,5605	76,5511	87,1479	1
205,0746	2,6280	53,1037	77,7526	2
257,4592	2,7128	70,0235	95,2862	3
144,7152	2,6280	50,1072	79,5408	4
457,1025	4,2387	127,5852	151,2372	5
218,3868	2,6280	80,8548	83,4828	6
404,5425	4,0692	127,9243	130,0436	7
788,4000	8,1383	206,4252	223,4648	8
552,0552	6,0444	142,3500	151,4604	9
698,9632	7,7992	167,7681	166,0726	10
888,0888	8,9352	185,8872	196,2240	11
554,7623	5,9342	124,0246	138,0124	12
441,5040	3,8148	86,3001	91,9800	13
567,8357	6,0069	131,9631	132,2447	14
183,8752	1,5259	47,7279	79,0095	15
141,9996	2,6280	49,4940	78,8400	16
97,2360	0,0000	43,9978	68,8366	17
215,4960	2,6280	80,5044	82,0812	18
152,3392	2,6280	60,9526	63,7502	19
155,1368	1,0173	61,5461	95,4557	20
583,2408	6,3948	148,8324	157,2420	21
341,5552	3,7301	108,7653	106,5612	22
409,7928	4,0296	90,7536	106,1712	23
328,6695	3,2214	76,5511	97,4903	24
147,5071	2,6280	36,7920	66,4630	25
159,8387	1,8771	43,7374	70,6744	26
94,1841	0,0000	21,1935	58,5790	27
55,1004	0,0000	29,3460	59,3052	28
112,8345	0,5086	47,8126	71,3799	29
533,8344	5,8692	163,8120	184,1352	30
812,1368	7,8840	234,3159	237,4525	31
833,1608	8,3926	217,2763	232,1965	32
733,1244	7,7964	180,8064	185,4492	33
1319,2560	12,8857	271,8708	269,2428	34
2125,6140	21,4620	431,6928	430,1160	35
625,2945	6,5276	138,9449	150,9828	36
344,2680	3,2214	69,9387	83,8417	37
567,8357	5,6314	132,4324	132,5263	38
604,6095	6,0190	175,9912	173,8719	39
919,6248	9,1104	247,7328	257,3688	40
2033,9872	18,6503	495,0813	516,5292	41
1224,4728	12,0888	345,4944	406,1136	42
2680,5600	25,9409	721,8523	730,5840	43
1708,1152	18,3960	417,4281	409,1203	44
685,8204	7,0956	171,1704	176,5140	45
772,6320	7,8840	180,3995	178,6192	46
625,2012	6,3948	133,4148	147,0804	47
262,9695	2,6280	62,3938	85,8763	48
486,0952	4,7474	92,7430	96,2187	49
459,9906	4,6217	108,6542	116,3570	50
199,8128	2,5432	52,0514	82,3157	51
491,3484	5,0808	138,9336	159,1692	52
1942,1768	17,5483	473,9725	495,3356	53
1392,7524	14,0160	389,1192	460,4256	54
1547,8072	15,1746	425,9055	431,7550	55
1321,7145	13,8182	328,8391	331,2128	56
903,8568	9,3732	217,1604	217,0728	57
988,2975	9,6643	216,4285	214,6483	58
483,4644	4,5552	105,7332	119,8368	59
231,1792	2,6280	55,5271	80,1964	60

Tabela 5.3 Outorgas entre as UHEs de Passo Real e de Jacuí

O211	O212	O213	O214	O215	O216	Discretização
(614,9520)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	1
(614,9520)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	2
(614,9520)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	3
(614,9520)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	4
(614,9520)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	5
(614,9520)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	6
(614,9520)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	7
(614,9520)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	8
(614,9520)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	9
(614,9520)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	10
(614,9520)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	11
(614,9520)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	12
(614,9520)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	13
(614,9520)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	14
(614,9520)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	15
(614,9520)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	16
(614,9520)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	17
(614,9520)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	18
(614,9520)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	19
(614,9520)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	20
(614,9520)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	21
(614,9520)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	22
(614,9520)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	23
(614,9520)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	24
(614,9520)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	25
(614,9520)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	26
(614,9520)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	27
(614,9520)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	28
(614,9520)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	29
(614,9520)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	30
(614,9520)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	31
(614,9520)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	32
(614,9520)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	33
(614,9520)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	34
(614,9520)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	35
(614,9520)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	36
(614,9520)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	37
(614,9520)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	38
(614,9520)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	39
(614,9520)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	40
(614,9520)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	41
(614,9520)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	42
(614,9520)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	43
(614,9520)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	44
(614,9520)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	45
(614,9520)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	46
(614,9520)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	47
(614,9520)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	48
(614,9520)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	49
(614,9520)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	50
(614,9520)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	51
(614,9520)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	52
(614,9520)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	53
(614,9520)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	54
(614,9520)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	55
(614,9520)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	56
(614,9520)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	57
(614,9520)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	58
(614,9520)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	59
(614,9520)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	60

Tabela 5.4 Outorgas entre as UHEs de Jacuí e de Itaipua

O321	O322	O323	O324	O325	O326	Discretização
(1629,3600)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	1
(1629,3600)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	2
(1629,3600)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	3
(1629,3600)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	4
(1629,3600)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	5
(1629,3600)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	6
(1629,3600)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	7
(1629,3600)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	8
(1629,3600)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	9
(1629,3600)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	10
(1629,3600)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	11
(1629,3600)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	12
(1629,3600)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	13
(1629,3600)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	14
(1629,3600)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	15
(1629,3600)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	16
(1629,3600)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	17
(1629,3600)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	18
(1629,3600)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	19
(1629,3600)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	20
(1629,3600)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	21
(1629,3600)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	22
(1629,3600)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	23
(1629,3600)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	24
(1629,3600)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	25
(1629,3600)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	26
(1629,3600)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	27
(1629,3600)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	28
(1629,3600)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	29
(1629,3600)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	30
(1629,3600)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	31
(1629,3600)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	32
(1629,3600)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	33
(1629,3600)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	34
(1629,3600)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	35
(1629,3600)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	36
(1629,3600)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	37
(1629,3600)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	38
(1629,3600)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	39
(1629,3600)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	40
(1629,3600)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	41
(1629,3600)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	42
(1629,3600)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	43
(1629,3600)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	44
(1629,3600)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	45
(1629,3600)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	46
(1629,3600)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	47
(1629,3600)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	48
(1629,3600)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	49
(1629,3600)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	50
(1629,3600)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	51
(1629,3600)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	52
(1629,3600)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	53
(1629,3600)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	54
(1629,3600)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	55
(1629,3600)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	56
(1629,3600)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	57
(1629,3600)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	58
(1629,3600)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	59
(1629,3600)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	60

Tabela 5.5 Outorgas entre as UHEs de Itaíba e de D. Francisca

O431	O432	O433	O434	O435	O436	Discretização
(988,1280)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	1
(988,1280)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	2
(988,1280)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	3
(988,1280)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	4
(988,1280)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	5
(988,1280)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	6
(988,1280)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	7
(988,1280)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	8
(988,1280)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	9
(988,1280)	0,0000	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	10
(988,1280)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	11
(988,1280)	(4,8881)	(0,4205)	(0,1051)	0,0000	0,0000	12
(988,1280)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	13
(988,1280)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	14
(988,1280)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	15
(988,1280)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	16
(988,1280)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	17
(988,1280)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	18
(988,1280)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	19
(988,1280)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	20
(988,1280)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	21
(988,1280)	0,0000	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	22
(988,1280)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	23
(988,1280)	(5,0836)	(0,4289)	(0,1114)	0,0000	0,0000	24
(988,1280)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	25
(988,1280)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	26
(988,1280)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	27
(988,1280)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	28
(988,1280)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	29
(988,1280)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	30
(988,1280)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	31
(988,1280)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	32
(988,1280)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	33
(988,1280)	0,0000	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	34
(988,1280)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	35
(988,1280)	(5,2869)	(0,4375)	(0,1181)	0,0000	0,0000	36
(988,1280)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	37
(988,1280)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	38
(988,1280)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	39
(988,1280)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	40
(988,1280)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	41
(988,1280)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	42
(988,1280)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	43
(988,1280)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	44
(988,1280)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	45
(988,1280)	0,0000	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	46
(988,1280)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	47
(988,1280)	(5,4984)	(0,4462)	(0,1252)	0,0000	0,0000	48
(988,1280)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	49
(988,1280)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	50
(988,1280)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	51
(988,1280)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	52
(988,1280)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	53
(988,1280)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	54
(988,1280)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	55
(988,1280)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	56
(988,1280)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	57
(988,1280)	0,0000	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	58
(988,1280)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	59
(988,1280)	(5,7184)	(0,4551)	(0,1327)	0,0000	0,0000	60

Tabela 5.6 Ontorgas a jusante da UHE D. Francisca

O041	O042	O043	O044	O045	O046	Discretização
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	1
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	2
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	3
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	4
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	5
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	6
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	7
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	8
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	9
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	10
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	11
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	12
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	13
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	14
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	15
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	16
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	17
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	18
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	19
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	20
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	21
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	22
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	23
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	24
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	25
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	26
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	27
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	28
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	29
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	30
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	31
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	32
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	33
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	34
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	35
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	36
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	37
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	38
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	39
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	40
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	41
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	42
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	43
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	44
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	45
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	46
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	47
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	48
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	49
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	50
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	51
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	52
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	53
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	54
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	55
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	56
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	57
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	58
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	59
0,0000	(557,1360)	0,0000	0,0000	0,0000	(36,7920)	60



## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, Paulo de Bessa. *Direito ambiental*. 6a ed. Rio de Janeiro: Lúmen Júris. p.569-616. 2002.
- ARON, Raymond. *As Etapas do Pensamento Sociológico*. 4 ed. São Paulo: Martins Fontes. 1993.
- AVOGRADO, E.; MINCIARDI, R. A decision support system for environmental planning in water resources. In: MÜLLER, A. *Hydroinformatics' 96*. Rotterdam: A. A. Blakema. p.417-23. 1996.
- BALLESTERO, E. *Selecting the CP Metric: a risk aversion approach*. In: *European Journal of Operational Research* 97, nº 3. p. 421-27. 1997.
- BANA e COSTA, Carlos; VASNICK, Jean-Claude. *Uma Nova Abordagem ao Problema da Construção de uma Função de Valor Cardinal: MACBETH*. *Investigação Operacional – Escola de Novos Empreendedores da UFSC, Florianópolis*, vol. 15, no 1 (Junho). p.15-35. 1995.
- BARLOW, Maude; CLANKE, Tony. *Ouro Azul*. São Paulo: M. Books do Brasil. 331p. 2003.
- BASTOS, Alexandre Antunes Parreiras. *A dinâmica de sistemas e a compreensão de estruturas de negócios*. São Paulo. Dissertação (Mestre em Administração). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade. Universidade de São Paulo. 122p. 2003.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis: an integrated approach*. Norwell: Kluwer Academic Publishers. 372p. 2003.

- BENAYOUN, R.; MONTGOLFIER, J.; TERGNY, J.; LARITCHEV, O. *Linear Programming with Multiple Objective Functions: step method (STEM)*. Mathematical Programming, 1, p. 366-75. 1971.
- BENSON, H. P.; MORIN, T. L. *The Vector Maximization Problem: proper efficiency and stability*. SIAM Journal on Applied Mathematics, 32. p. 64-72. 1977.
- BERNARD ROY, Vincent M.; FIGUEIRA, José. Electre Methods. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, Salvatore; EHRGOTT, Matthias. *Multiple Criteria Decision Analysis: state of the art surveys*. New York: Springer. p. 133-62. 2005.
- BERTALANFFY, Ludwig Von. *Teoria Generale dei Sistemi: fondamenti, sviluppo e applicazione*. Milano: Oscar Mondadori. 2004.
- BESSET, Jean-Paul. Faire face à l'agression climatique. In: *Le Monde*. Paris, 9 de agosto de 2003.
- BOBBIO, Norberto. *Liberalismo e democracia*. 3. ed. São Paulo: Brasiliense. p.1-40. 1994.
- BOUGUERRA, Mohamed L. *As batalhas da água: por um bem comum da humanidade*. Petrópolis: Vozes. 238p. 2004.
- BOYER, Carl B. *História da Matemática*. São Paulo: Blücher. 1996.
- BRAGA, Bendito P. F. *An evaluation of stream flow forecasting model for short-range multiobjective reservoir operation*. Stanford. Tese (Philosophy Doctor). Stanford University. 1979.
- BRAGA, Bendito P. F. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. Cap. 5. In: BARTH, Flávio T. et al. *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel; ABRH. p.425-518. 1987.
- BRAGA, B. P. F.; ROCHA, J. M. M. Localização do Pólo Petroquímico do Rio de Janeiro - uma análise multiobjetivo. In: *Revista Águas e Energia Elétrica*. São Paulo. Vol. 5. nº 13. p.54-60. 1988.
- BRANDÃO, João Luiz Boccia. *Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos*. São Paulo. Tese (Doutro em Engenharia). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 160p. 2004.
- BRANS, Jean-Pierre; MARESCHAL, Bertrand. Promethee Methods. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, Salvatore; EHRGOTT, Matthias. *Multiple Criteria Decision Analysis: state of the art surveys*. New York: Springer. p. 133-62. 2005.
- BRASIL. *Decreto nº 88.351, de 01 de junho de 1983*. Regulamenta a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, que dispõem, respectivamente, sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental, e dá outras providências. Publicado, no DOU, de 02 de junho de 1981.
- BRASIL. *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981*. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Publicada, no DOU, de 02 de setembro de 1981.
- BRASIL. *Decreto nº 99.274, de 06 de junho de 1990*. Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e dá outras providências. Publicado, no DOU, de 07 de junho de 1990.

- BRASIL. *Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996*. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Publicada, no DOU, de 27 de dezembro de 1996.
- BRASIL. *Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Publicada, no DOU, de 9 de janeiro de 1997.
- BRASIL. *Decreto nº 2.335, de 06 de outubro de 1997*. Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. Publicado, no DOU, de 07 de outubro de 1997.
- BRASIL. *Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000*. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Publicada, no DOU, de 18 de julho de 2000.
- BRASIL. *Decreto nº 4.613, de 12 de março de 2003*. Regulamenta o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Publicado, no DOU, de 12 de março de 2003.
- BROUWER, F. *Integrated environmental modeling: design and tools*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1987.
- BROIJNZEEL, L. A. Predicting the hydrological impacts of tropical forests and effects of conversion: the need for integrated research. Cap. 2. In: GASH, J. H. C. et al. *Amazonia Deforestation and climate*. Chichester, England: John Wiley & CO. 1996.
- CAMARGO, C. Celso de B.; BORENSTEIN, R. C.. *O Setor Elétrico no Brasil: Dos desafios do passado às alternativas do futuro*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto. 318p. 1997.
- CAUBET, Christian G. *A água, a lei, a política ... e o meio ambiente?* Curitiba: Juruá. 306p. 2004.
- CAVALCANTI, Iracema F.; KOUSKI, Vernon E. A estiagem durante o verão e outono de 2001 no Brasil e as características atmosféricas associadas. In: *Portal de Energia, Centro de Previsão do tempo e Estudos Climáticos – CPTEC*. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/energia/saiba/cripop.shtml>. Acessado em 16 de maio de 2005.
- CHANKONG, V.; HAIMES, Y.Y. *Multiobjective Decision Making Theory and Methodology*. New York: Elsevier Science. 1983.
- CHARNES, A.; COOPER, W.W.; FERGUSON, R.O. *Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming*. In: *Management Science* 1, nº 2. p. 138-151. 1955.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W. *Goal Programming and Multiple Objective Optimization*. *European Journal of Operational Research*. P.39-54. 1977.
- CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. *Physical Geography: a systems approach*. London: Englewood Cliffs, Prentice Hall. 1971.
- CHRISTOFOLETTI, Antonio. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Edgard Blücher. 236p. 1999.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 006, de 16 de setembro de 1987*. Dispõe sobre a necessidade de que sejam editadas regras gerais para o licenciamento ambiental de obras de grande porte, especialmente aquelas nas quais a União tenha interesse relevante como a geração de

energia elétrica, no intuito de harmonizar conceitos e linguagem entre os diversos intervenientes no processo. Publicado, no DOU, de 22 de outubro de 1987.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997*. Dispõe sobre a necessidade de revisão dos procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental, de forma a efetivar a utilização do sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental, instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente; a necessidade de se incorporar ao sistema de licenciamento ambiental os instrumentos de gestão ambiental, visando o desenvolvimento sustentável e a melhoria contínua; as diretrizes estabelecidas na Resolução CONAMA nº 011/94, que determina a necessidade de revisão no sistema de licenciamento ambiental; a necessidade de regulamentação de aspectos do licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional de Meio Ambiente que ainda não foram definidos; a necessidade de ser estabelecido critério para exercício da competência para o licenciamento a que se refere o artigo 10 da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981; a necessidade de se integrar a atuação dos órgãos competentes do Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA na execução da Política Nacional do Meio Ambiente, em conformidade com as respectivas competências. Publicado, no DOU, de 20 de dezembro de 1997.

CORLEY, H.W. *A New Scalar Equivalence for Pareto Optimization*. In: IEEE Transactions on Automatic Control 25, nº 4. p. 829-30. 1980.

DALY, H. Epílogo: algunos malentendidos comunes y otros problemas relacionados con una economía en estado estacionario. In: DALY, H. *Economía, ecología e ética*. México: Fondo de Cultura Económica. 1989.

DALY, Herman E. *Steady State Economics*, 2ª ed. Washington DC: Island Press. 1991.

DALY, Herman E.; COBB, John B. *For the common good: redirecting the economy toward community, the environment, and a sustainable future*. Boston: Beacon Press. 1989.

DASGUPTA, P. S. e HEAL, G. *The optimal depletion of exhaustible resources*. In: Review of Economics Studies. Symposium Issue. pp. 1-23. 1974.

DEMO, Pedro. *Metodologia Científica em Ciências Sociais*. São Paulo: Atlas. 255p. 1980.

DIEGUES Antônio C.; MOREIRA André de Castro C. (organizadores). *Espaços e recursos naturais de uso comum*. São Paulo: NUPAUB-USP. 294p. 2001.

DREW, David. *Processos Interativos Homem-Meio Ambiente*. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil. 224p. 2002.

DRNE. Divisão de Recursos Naturais e Energia da Comissão Econômica para América Latina e Caribe. *Procedimientos de Gestión para un Desarrollo Sustentable*. Chile: Comissão Econômica para América Latina e Caribe (CEPAL). 1993.

DYER, James S. Multiattribute Utility Theories. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, Salvatore; EHRGOTT, Matthias. *Multiple Criteria Decision Analysis: state of the art surveys*. New York: Springer. p. 133-62. 2005.

EHRGOTT, M. *Multicriteria Optimization*. New York: Springer. 2005.

ENSSLIN, Leonardo; MONTIBELLER-NETO, Gilberto; NORONHA, Sandro M. *Apoio à Decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas*. Florianópolis: Editora Insular. 295p. 2001.

FAUCHEUX, S.; NOËL, J. *Economia dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente*. Lisboa: Instituto Piaget. 445p. 1995.

- FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roesster – RS. *Qualidade Ambiental: região hidrográfica do Guaíba*. Disponível em <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/jacui.asp>. Acessado em 28 de agosto de 2008.
- FLORENTIN, Carlos Manuel Cardozo. *Operação de sistemas hidroelétricos em ambiente competitivo: uma abordagem da gestão empresarial via simulação estocástica e dinâmica de sistemas*. Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. 259p. 2000.
- FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. Genetic Algorithms for Multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization. In: *Genetic Algorithms: Proceeding of the Fifth International Conference*. San Mateo. p. 416-23. 1993.
- FORRESTER, Jay W. *Industrial dynamics*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press. 1961.
- FORRESTER, Jay W. *Principles of systems*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press. 1968.
- FORRESTER, Jay W. *Urban Dynamics*. Williston: Pegasus Communications. 285p. 1969.
- FORRESTER, Jay W. *World dynamics*. 2. ed. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, Wright-Allen Press. 1973.
- FURTADO, Celso. *Em busca de novo modelo: reflexões sobre a crise contemporânea*. 2. ed. São Paulo: Paz e Terra. 101p. 2002.
- GASS, S.; SAATY, T. L. *The computational algorithm for the parametric objective function*. Naval Research Logistics Quarterly, 2. p. 39-45. 1955.
- GEERTZ, Clifford. *A Interpretação das Culturas*. Rio de Janeiro: Zahar. 1989.
- GEOFFRION, A. M.; DYER, J. S.; FEINBERG, A. *An Interactive Approach for Multicriterion Optimization, with an application to the operation of an academic department*. Management Science 19, nº 4. p. 357-68. 1972.
- GODARD, O. A Gestão Integrada dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente: conceitos, instituições e desafios de legitimação. In: VIEIRA, P. F.; WEBER, J. *Gestão dos Recursos Naturais Renováveis e Desenvolvimento: novos desafios para pesquisa ambiental*. São Paulo: Cortez. p.201-66. 2002.
- GOICOECHEA, A.; HANSEN, D.; DUCKSTEIN, L. *Introduction to multiobjective analysis with engineering and business applications*. John Wiley: New York. 1982.
- GOICOECHEA, A.; STAKHIV, E. Z.; LYN. I. F. Experimental evaluation of multiple criteria decision models for application to water resources planning. In: *Water Resources Bulletin. Bethesda*. AWRA. Vol. 28. nº 1. 1992.
- GOMIDE, Francisco L. S.; MARTINS, José A.; HOLTZ, Antonio C. T.; PINTO, Nelson L. de S. *Hidrologia Básica*. São Paulo: Edgard Blücher. 278p. 1976.
- GOOGLE. *Google Earth*. Versão free no 4.3.7284.3916 (beta). Data da compilação, 8 de julho de 2008.
- HAGGET, P.; CHORLEY, R. J. Modelos, paradigmas e a nova geografia. In: *Modelos físicos e de informação em geografia*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. p.1-19. 1975.
- HAIGH, M. J. Geography and general systems theory, philosophical homologies and current practice. In: *Geoforum*. 16(2). p.191-203. 1985.

- HAIMES, Y. Y.; HALL, W. A. *Multiobjective Optimization in Water Resources Systems: the surrogate worth trade-off methods*. New York: Elsevier Scientific. 1975.
- HAIMES, Y.Y.; LASDOSN, L.S.; WISMER, D.A. *On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization*. In: IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics 1. p. 296-97. 1971.
- HARVEY, D. *Explanation in geography*. London: Edward Arnold. 1969.
- HARDIN, Garret. The tragedy of the commons. In: *Science*. 162. p.1243-48. 1968.
- HOBBS, B. F.; CHANKONG, V.; HAMADEH, W.; STAKHIV E. Z. *Does Choice of Multicriteria Method Matter? An Experiment in Water Resources Planning*. In: *Water Resources* 28, nº 7. p. 1767–79. 1992.
- HOBBS, Benjamin F.; MEIER Peter. *Energy Decisions and the Environment: A Guide of the Use of Multicriteria Methods*. Norwell: Kluwer. 257p. 2000.
- HWANG, C.; MASUD, A.S.M. *Multiple Objective Decision Making – Methods and Application: a state-of-the-art survey*. In: *Economics and Mathematical Systems* 164. Berlin: Spring-Verlag. 1979.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico e Contagem da População: histórico*. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em 2008.
- JANNUZZI, G. M.; SWISHER, J. N. P. *Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis*, Campinas: Autores Associados. 246p. 1997.
- JARDIM, Sergio Brião. *Aplicabilidade de algumas técnicas de análise multiobjetivo ao processo decisório no âmbito de comitês de gerenciamento de bacia hidrográfica*. Porto Alegre. Dissertação (Mestre em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 187p. 1999.
- JARDIM, Sergio Brião. *A cobrança eficiente pela garantia de disponibilidade e pelo uso da água: proposta de um modelo multicritério de gestão*. Porto Alegre. Tese (Doutor em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 350p. 2003.
- JOHNSON, L. E. Water resources management decision support systems. *Journal of water resource planning and management*. p.308-25. 1986.
- KALISZEWSKI, I; MICHALOWSKI, W. *Generation of Outcomes with Selectively Bounded Trade-offs*. In: *Foundations of Computing and Decision Sciences* 20, nº2. p. 113-22. 1995.
- KALISZEWSKI, I; MICHALOWSKI, W. *Efficient Solutions and Bounds on Trade-offs*. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 94, nº2. p. 381-94. 1997.
- KEENEY, R. L. *Value-focused thinking: a path to creative decision making*. Cambridge: Harvard University. 416p. 1998.
- KEENEY, Ralph L.; RAIFFA, Howard. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge: Cambridge University Press. 569p. 1976.
- KUNDZEWICZ, Z. W. *New uncertainty concepts in hydrology and water resources*. Cambridge: Cambridge University Press. 1995.
- LANNA, Antonio E. Introdução. In: PORTO, Ruben L. L. (org). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Porto Alegre: UFRGS; ABRH. P. 15-42. 1997.

- LANNA, Antonio E. Gestão dos recursos Hídricos. Cap. 19. In: TUCCI, Carlos E. M. (org.). *Hidrologia ciência e aplicação*. Porto alegre: UFRGS; ABRH. 943p. 2002a.
- LANNA, A. Eduardo. Hidroeconomia. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. *Águas Doces no Brasil*. 2ª ed. São Paulo: Escrituras. p.531-62. 2002b.
- LUI, G. P.; YANG, J. B.; WHIDBORNE, J. F. *Multiobjective Optimization and Control*. England: Research Studies Press LTD. 2003.
- MACHADO, Carlos J. S.; MACEDO, Maria Lucia de. O paradoxo da democracia das águas. In: *Revista Informativa da Associação Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH Notícias nº 2. Julho de 2000.
- MAGALHÃES, Antonio. Variáveis e desafios do processo decisório no contexto dos comitês de bacia hidrográfica no Brasil. In: *Ambiente e Sociedade*. São Paulo: Fapesp; Campinas: Unicamp, Nepam. Ano IV, nº 8. Janeiro/junho de 2001.
- MAGALHÃES Jr., Antonio P. *Indicadores ambientais e recursos hídricos: realidade e perspectivas para o Brasil a partir da experiência francesa*. Rio de Janeiro: Bertrnd Brasil. 688p. 2007.
- MAGRINI, A.; BREDARIOL, C. Conflito Ambiental e Negociação. In: MAGRINI, A.; SANTOS, M. A. *Gestão Ambiental de Bacias Hidrográficas*. Rio de Janeiro: UFRJ; COPPE; IVIG. p.243-71. 2001.
- MAUAD. F. F.; LIMA, G. Planejamento estratégico de sistemas hídricos. In: MARTINS, R. C.; VALENCIO, Norma F. L. S. *Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil: desafios teóricos e político-institucionais*. Vol. 2. São Carlos: RiMa. p.99-126. 2003
- MCKIN, H. L.; CASSEL, E. A.; LAPOTIN, P. J. Water resource modeling using remote sensing and object-oriented simulation. *Hydrological Processes*. v. 7. p.153-65. 1993.
- MEADOWS, Dennis L.; MEADOWS, Donella H.; RANDERS, JÓrgen; BEHRENS II, William W. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books for Potomac Associates. 1972
- MERICO, L. F. K. *Introdução à Economia Ecológica*. Blumenau: Editora da FURB. 160 p. 1996.
- MÉSZÁROS, István. *Para Além do Capital*. Parte III - Crise Estrutural do Sistema do Capital. 1ª Ed. (maio/3.500 exemplares). São Paulo: Editora Boitempo. p.605-982. 2002.
- MIETTINEN, Kaisa. *Nonlinear Multiobjetivo Optimization*. Norwell: Kluwer Academic Publishers. 298p. 1999.
- MONTIBELLER-FILHO. G. *O Mito do Desenvolvimento Sustentável: meio ambiente e custos sociais no moderno sistema produtor de mercadorias*. Florianópolis: EdiUFSC. 306p. 2001.
- NWC. National Water Resources Council. *Water policies for the future*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office. 1973.
- ODUM, Howard T. *Systems Ecology*. New York: John Wiley & Sons. 1983.
- ODUM, Howard T. *Environmental Accounting: eMergy and environmental decision making*. New York: John Wiley & Sons. 370p. 1996.
- ODUM, Howard T., ODUM, Elisabeth C. *Modeling for all scales: an introduction to system simulation*. New York: Academic Press. 2000.
- OLIVEIRA, Wilnice Tavares Reis de. *Utilizando integrais fuzzy em tomada de decisão multicritério*. Florianópolis. Dissertação (Mestre em Ciência da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina. 93p. 2003.

- OLLAGNON, H. Estratégia Patrimonial para Gestão dos Recursos e dos Meios Naturais: enfoque integrado da gestão do meio rural. In: VIEIRA, P. F.; WEBER, J. *Gestão dos Recursos Naturais Renováveis e Desenvolvimento: novos desafios para pesquisa ambiental*. São Paulo: Cortez. p.171-200. 2002.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias da bacia do rio Jacuí (ciclo 2006-2007)*. RE 3/296/2006. 30p. 2006.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Inventário das Restrições Operativas Hidráulicas dos Aproveitamentos Hidrelétricos*. RE 3/144/2007. p. 32-4. 2007a.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. *HydroEdit. – Software*. Versão 2.0. 24 de abril de 2007b.
- ORTEGA, Jéferson Meneguim. *Gestão de centrais termelétricas a GN em ambiente competitivo: uma abordagem via dinâmica de sistemas*. Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. 156p. 2001.
- OSYCZKA, A. Multicriteria Decision Making with Min-Max Approach. In: ESCHENAUER, H., OLHOFF, N. *Optimization Methods in Structural Design*. Wissenschaftsverlag. 1989.
- PASSET, R. *L'Économie et le vivant*. (Traces). Paris: Payot, 1979.
- PASSY, U.; LEVANON, Y. *Analys of Multiobjective Decision Problems by Indifference Band Approach*. In: Journal of Optimization Theory and Applications 43, nº 2. p. 205-35. 1984.
- PETRELLA, Ricardo. *O manifesto da água: argumentos para um contrato mundial*. Petrópolis: Vozes. 159p. 2002.
- PILLET, Gonzaga. *Economia Ecológica: Introdução à economia do ambiente e dos recursos naturais*. Lisboa: Instituto Piaget. 300p. 1993.
- PNRH. Plano Nacional de Recursos Hídricos. *Documento base de referência*. Brasília/DF: Ministério do Meio Ambiente; Secretária de Recursos Naturais; Agência Nacional de Águas. 383p. Novembro de 2003.
- POPPER, K. *A lógica da pesquisa científica*. São Paulo: Cultrix. 1975.
- POPPER, K. *Autobiografia intelectual*. São Paulo: Cultrix, EdUSP. 263p. 1977.
- POPPER, K. *The open society and its enemies*. 5th. ed. London: Routledge & K. Paul, 1966.
- PORTO, Ruben L. L.; AZEVEDO, Luiz Gabriel T. Sistemas de Suporte ‘a Decisões Aplicadas a Problemas de Recursos Hídricos. In: PORTO, Ruben L. L. (org). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Porto Alegre: UFRGS; ABRH. P. 43-96. 1997.
- PRATO, Tony; HERATH, Gamini. *Using Multi-Criteria Decision Analysis in Natural Resource Management*. Burlington: Ashgate. 239p. 2006.
- PRESTRE, Philippe L. *Ecopolítica Internacional*. São Paulo: Senac. 518p. 2000.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. *La Nouvelle Alliance: métamorphose de la science*. Paris: Gallimard. 1979.
- REBOUÇAS, Aldo da Cunha. *Uso inteligente da água*. São Paulo: Escrituras. 207p. 2004.
- REBOUÇAS, Aldo da Cunha.. *Água doce no mundo e no Brasil*. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. *Águas Doces no Brasil*. 2ª ed. São Paulo: Escrituras. p.1-37. 2002.
- RICHMOND, B.; PETERSON, S.; VESCUSO, P. *An academic User's Guide to STELLA*. Lyem: New Hebrides, High Performance Systems. 1987.

- RIO GRANDE DO SUL. *Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994*. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. Publicado no DOE de 1º de janeiro de 1995.
- ROBERTO, Alexandre Nunes. *Modelos de rede de fluxo para alocação da água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica*. São Paulo. Dissertação (Mestre em Engenharia). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 116p. 2002.
- ROSA, Luiz P.; TOLMASQUIM, Mauricio T.; LINHARES, José C. *A reforma do setor elétrico no Brasil e no mundo: uma visão crítica*. Rio de Janeiro: Editora Relume Dumará; Coppe; UFRJ. 211p. 1998.
- ROSENTHAL, R. E. *Principles of Multiobjective Optimization*. In: *Decision Sciences* 16, nº 2. p. 133-52. 1985.
- ROSINGER, E.E. *Aids for Decision Making with Conflicting Objectives*. In: SERAFIN, P. *Mathematics of Multiobjective Optimization*. New York: Springer-Verlag. pp. 275-315. 1985.
- RUHOFF, Anderson Luis. *Gerenciamento de Recursos Hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com simulação de cenários preservacionistas*. Santa Maria. Dissertação (Mestre em Geomática). Programa de Pós-graduação em Geomática. Universidade Federal de Santa Maria. 93p. 2004.
- SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: MacGraw-Hill. 1980.
- SAKAWA, M. *Interactive Multiobjective Decision Making by the Sequential Proxy Optimization Technique: SPOT*. In: *European Journal of Operational Research* 9, nº 4. p. 386-96. 1982.
- SEMA. Secretária Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. *Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul: ano referência 2006*. Porto Alegre: Departamento de Recursos Hídricos, Conselho de Recursos Hídricos. 2007.
- SCHUCH, Gladis Bordin. *Um modelo para estudos da demanda de energia elétrica em ambiente competitivo*. Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. 191p. 2000.
- SHERALI, H. D. *Equivalent Weights for Lexicographic Multiobjective Programs: characterizations and computations*. In: *European Journal of Operational Research* 11, nº 4. p. 367-79. 1982.
- SICA, Everthon Taghori. *Internalização de Variáveis Qualitativas no Planejamento de Sistemas Elétricos de Energia: uma proposta metodológica*. Florianópolis. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. 265p. 2003.
- SICA, Everthon Taghori; CAMARGO, C. Celso de Brasil. *The Water Use while Critical Natural Capital in the Context of the Brazilian Electric Sector*. In: *IEEE/PES/T&D - Transmission And Distribution - Latin America*. São Paulo: IEEE Latin América. 2004a.
- SICA, Everthon Taghori; CAMARGO, C. Celso de Brasil. *Instrumentos Econômicos de Gestão e Regulação Ambiental aplicados ao Setor Energético em Ambiente de Mercado*. In: *X Congresso Brasileiro de Energia*. Rio de Janeiro: X CBE. 2004b.
- SICA, Everthon Taghori; CAMARGO, C. Celso de Brasil. *Regulation and Structure Flaws of the Electrical Energy Market: of the use to the valuation of public good*. In: *IX Symposium Of Specialists In Electric Operational And Expansion Planning*. SP-096. Rio de Janeiro: CIGRÉ – Brasil. 2004c.
- SICA, Everthon Taghori; CAMARGO, C. Celso de Brasil. *Integrated Resources Planning of Electric Energy Systems in a Market Environmental: a modelling multicriteria for decision making*. In: *IEEE/PES/T&D - Transmission And Distribution - Latin America*. São Paulo: IEEE Latin America, 2004d.

- SICA, Everthon Taghori; SOUZA, Lisandra Stein e; FERNANDES, Rubiapiara C. Impacto da Regulação Jurídico-Ambiental no Ambiente de Mercado do Setor Elétrico Brasileiro: os usos múltiplos das águas. In: *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. GME-22. Curitiba. XVIII SNPTEE. 2005.
- SIMONOVIC, Slobodan P. World water dynamics: global modeling of water resources. In: *Journal of Environmental Management*. 66. p.249-67. 2002.
- SINGER, E. M.; HARRIS, V. Determinação de sítios potenciais para aproveitamentos hidrelétricos reversíveis através de análise multicriterial. In: *IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Vol. 2. p.493-99. 1991.
- SINGH, V. P. *Elementary Hydrology*. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 1992.
- SOLOW, R. M. *The economics of resources or the resources of economics*. In: *American Economic Review*, 64, Papers and Proceedings. pp. 1-14. 1974.
- SPEIDEL, D. H.; RUEDISILI, L. C.; AGNEW, A. F. *Perspectives on water: uses and abuses*. New York: Oxford University Press. 388p. 1988.
- STIGLITZ, J. E. *Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths*. In: *Review of Economics Studies*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources. pp. 123-37. 1974.
- STEUER, R. E. *Multiple Criteria Optimization: theory, computation and application*. Ed. John Wiley & Sons. 1986.
- TEIXEIRA, A. C.; BARBOSA, P. S. F. Avaliação multicriterial de alternativas de projetos de barragens de uso múltiplo. In: *XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Recife: ABRH. Vol. 3. p.73-7. 1995.
- TUCCI, Carlos E. M. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. UFRGS; ABRH. 669p. 1998.
- TUNDISI, J. G. *Água no Século XXI: enfrentando a escassez*. São Carlos: RiMa e Instituto Internacional de Ecologia. 248p. 2003.
- UNITED NATIONS. *Global challenge, global opportunity: trends in sustainable development*. Johannesburg: United Nations. 2002.
- VASCONCELLOS, M. J. E. *Pensamento Sistêmico: o novo paradigma da ciência*. Campinas: Papirus. 2002
- VANDERPOOTEN, D. The Use of Preference Information in Multicriteria Interactive Procedures. In: LOCKET, A.G.; ISLEI, G. *Improving Decision Making in Organization*. Economics and Mathematical Systems 335. Berlin: Springer-Verlag. pp. 390-99. 1989.
- VERHAEGHE, R. J.; KROGT, W. N. M. van der. Decision support system for river basin planning. In: MÜLLER, A. *Hydroinformatics' 96*. Rotterdam: A. A. Blakema. p.67-74. 1996.
- WENDELLE, R.E.; LEE, D.N. *Efficiency I Multiple Objective Optimization Problems*. In: *Mathematical Programming* 12, nº 3. pp. 406-14. 1977.
- YU, P.L. *A Class of Solutions for Group Decision Problems*. In: *Management Science* 19, nº 8. pp. 936-946. 1973.
- ZADEH, L. A.; DESOER, C. A. *Linear system theory, the state space approach*. McGraw-Hill series in system science. New York: McGraw-Hill. 1963.

ZELENY, M. Compromise Programming. In: COCHRANE, J.L.; ZELENY, M.; *Multiplecriteria Decision Making*. South Carolina: University of South Carolina Press. p. 262-301. 1973.

ZILL, Dennis G.; CULLEN, Michael R. *Equações Diferenciais*. Vol. 2. São Paulo: Pearson Makron Books. 2001.

ZUFFO, Antonio Carlos. *Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos*. São Carlos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo. 1998.