

DINARA FERNANDES SILVA GYORI

**PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AUXÍLIO À
DECISÃO UTILIZANDO CONJUNTOS FUZZY PARA
REPOTENCIAÇÃO DE PCHS.**

DINARA FERNANDES SILVA GYORI

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AUXÍLIO À DECISÃO UTILIZANDO
CONJUNTOS FUZZY PARA REPOTENCIAÇÃO DE PCHS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga
Co-Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

Guaratinguetá
2012

G997p Gyori, Dinara Fernandes Silva
Proposta de Metodologia de Auxílio à Decisão utilizando Conjuntos Fuzzy para Repotenciação de PCHs / Dinara Fernandes Silva Gyori - Guaratinguetá : [s.n.], 2012.
152 f. : il.
Bibliografia: f. 143-152

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga
Coorientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

1. Usinas hidrelétricas 2. Desenvolvimento sustentável 3. Conjuntos difusos 4. Processo decisório I. Título

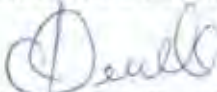
CDU 621.311.21(043)

DINARA FERNANDES SILVA GYORI


**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. DURVAL LUIZ SILVA RICCIULLI
Unesp-Feg


Prof. Dr. PALOMA MARIA SILVA ROCHA RIZOL
Unesp-Feg


Prof. Dr. AUGUSTO NELSON CARVALHO VIANA
UNIFEI


Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU

Julho de 2012

DADOS CURRICULARES

DINARA FERNANDES SILVA GYORI

NASCIMENTO	23.04.1980 – GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	Dinart Soares da Silva Francisca Rodrigues Fernandes
1999/2003	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP
2005/2007	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP
2007/2008	Programa Especial de Formação Pedagógica de Docentes para as Disciplinas do Currículo da Educação Profissional de Nível Médio, nível de Licenciatura Plena, na Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá – Centro Paula Souza.
2007/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

à DEUS, por estar sempre presente me abençoando com ânimo, paciência, perseverança e discernimento e, especialmente, ao meu marido e à minha família, que nos momentos mais difíceis estiveram ao meu lado, me apoiando e me incentivando nesta importante etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, como não poderia deixar de ser, agradeço à Deus por ter guiado meus passos, me fortalecendo a cada momento para que fosse possível superar as dificuldades,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Oscar A. Maldonado* e ao meu co-orientador, *Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri*, pelas muito bem direcionadas orientações e pela confiança em mim depositada,

aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio e carinho constante e incondicional,

ao Colégio Técnico, à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, à Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá, aos funcionários do Campus, aos meus colegas de trabalho, aos meus alunos, aos meus amigos, enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho,

em especial, ao meu marido *Carlos Gyori*, pela compreensão, companheirismo e amor a mim demonstrados, que foram essenciais para que o desânimo, em momento algum, se tornasse maior do que a minha vontade de vencer os obstáculos e alcançar mais esta conquista.

“A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

GYORI, D. F. S. **Proposta de metodologia de auxílio à decisão utilizando conjuntos fuzzy para repotenciação de PCHs.** 2012. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

O Brasil é um país que dispõe de abundância de recursos e domínio tecnológico no que diz respeito à geração hidrelétrica. A crescente demanda aliada aos critérios de sustentabilidade, que têm direcionado cada vez mais as tomadas de decisão, favorece o aumento da participação das PCHs na matriz de energia elétrica nacional e, por consequência, o aquecimento do mercado de repotenciação dessas usinas no país. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma metodologia multicriterial para auxiliar o processo de tomada de decisão envolvendo repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas. O método se baseia no Processo Analítico Hierárquico (AHP) convencional e utiliza os conjuntos *fuzzy* para tratar as variáveis lingüísticas do problema. A estrutura hierárquica é composta por dois níveis, sendo o primeiro formado por critérios principais: técnico, econômico e sócio-ambiental, e o segundo composto por subcritérios, apresentando quatro alternativas de repotenciação para a PCH em estudo. A prioridade dos critérios resulta da agregação dos julgamentos realizados por dois especialistas. Para demonstrar a utilidade da metodologia, foram realizados estudos de cenários de decisão para a repotenciação da PCH Sodré, localizada no município de Guaratinguetá e que se encontra desativada desde 1992. A implementa o da metodologia indica a repotencia o “Leve” como sendo a mais indicada para ser realizada na usina para o cenário I, que prioriza fortemente os critérios econômicos. No cenário II, que retrata uma situa o de crise energética, o *ranking* de decisão aponta a repotencia o tipo “Reconstru o” como sendo a mais apropriada.

PALAVRAS-CHAVE: Repotencia o. PCH. Tomada de Decisão. AHP. *Fuzzy*.

GYORI, D. F. S. Proposal for decision aid methodology using fuzzy sets to repowering SHPs. 2012. 152 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Brazil is a country with abundant resources and technological know-how in relation to hydroelectric generation. Increasing demand coupled with the sustainability criteria that have focused more and more decision-making, promotes increased participation of SHP in the national electric power mix and, consequently, the heating the repowering market these plants in the country. In this context, this paper presents a multicriteria methodology to aid the decision making process involving repowering of small hydroelectric power plants. The method is based on the conventional Analytical Hierarchy Process (AHP) uses fuzzy sets to handle the linguistic variables of the problem. The hierarchical structure consists of two levels, the first composed of the main criteria: technical, economic and socio-environmental, and the second composed of subcriteria, presenting four alternatives for SHP repowering study. The criteria priority resulting from the aggregation of judgments made by two specialists. To demonstrate the usefulness of the methodology, studies of decision-making scenarios for the repowering of Sodr  SHP, located in Guaratinguetá and who is disabled since 1992. The implementation of the methodology indicates repowering "Light" as being more suitable to be performed at the plant for the scenario I, which focuses heavily on the economic criteria. In scenario II, which depicts a situation of energy crisis, the decision ranking points the repowering such "Reconstruction" as the most appropriate.

KEYWORDS: Repowering. SHP. Decision-Making. AHP. Fuzzy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Usina Hidrelétrica: Principais Componentes	43
Figura 2 - Efeitos do Golpe de Aríete em um Conduto Forçado.....	46
Figura 3 - Grupo Turbina-Gerador	47
Figura 4 - Subestação Elevadora	48
Figura 5 - Rotor de uma Turbina Francis com Cavitações.....	51
Figura 6 - Substituição do Enrolamento de um Gerador	52
Figura 7 - Instalação de um Novo Rotor Pelton	53
Figura 8 - Perspectivas de Ganhos com a Repotenciação de UHEs no Brasil	66
Figura 9 - Balanço de Ponta (Sem Repotenciação) – 2013/15	68
Figura 10 - Balanço de Ponta (Com Repotenciação) – 2013/15	68
Figura 11 - Sistema de Tomada de Decisão	73
Figura 12 - Classificação dos Métodos de Análise de Decisão.....	74
Figura 13 - Disposição da Matriz de Decisão de um MCDA.....	77
Figura 14 - Processo de Tomada de Decisão MCDA.....	78
Figura 15 - Estrutura Hierárquica do Problema de Decisão	81
Figura 16 - Formato Geral da Matriz de Prioridade (AHP)	82
Figura 17 - Função de Pertinência: Conjunto Crisp	86
Figura 18 - Funções de Pertinência: Conjuntos Fuzzy	87
Figura 19 - Variável Lingüística: Temperatura	88
Figura 20 - União de Conjuntos Fuzzy.....	90
Figura 21 - Intersecção de Conjuntos Fuzzy	91
Figura 22 - Complemento de Conjuntos Fuzzy.....	91
Figura 23 - Centróide de uma Função de Pertinência Triangular.....	92
Figura 24 - Estrutura Hierárquica: Repotenciação de PCH.....	94
Figura 25 - Função de Pertinência: Prioridade dos Critérios.....	97
Figura 26 - Função de Pertinência: Burocracia/Legalização.....	98
Figura 27 - Função de Pertinência: Garantia de Disponibilidade.....	99
Figura 28 - Função de Pertinência: Encargos Sócio-Ambientais	100
Figura 29 - Função de Pertinência: Impactos Ambientais.....	101
Figura 30 - Função de Pertinência: Desenvolvimento Sócio-Econômico.....	102
Figura 31 - Formato Geral da Matriz de Prioridade (Fuzzy-AHP)	106

Figura 32 - PCH Sodré	110
Figura 33 - Tubulação Adutora Danificada: PCH Sodré.....	111
Figura 34 - Casa de Máquinas: PCH Sodré	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de Implantação de PCHs no Brasil.....	30
Tabela 2 - Índices Aleatórios para Matrizes de Ordem $n = 3, \dots, 10$	84
Tabela 3 - Cenários de Repotenciação: Critérios Quantitativos.....	113
Tabela 4 - Custo Total dos Cenários de Repotenciação da PCH Sodré	116
Tabela 5 - Funções de Pertinência: Subcritérios Qualitativos (Especialistas).....	117
Tabela 6 - Funções de Pertinência: Subcritérios Qualitativos (Agregação).....	118
Tabela 7 - Normalização Direta: Ganho de Energia.....	119
Tabela 8 - Normalização Inversa: Tempo de Indisponibilidade.....	119
Tabela 9 - Subcritérios Quantitativos Normalizados.....	119
Tabela 10 - Defuzzificação e Normalização: Garantia de Disponibilidade	120
Tabela 11 - Defuzzificação e Normalização: Encargos Sócio-Ambientais.....	120
Tabela 12 - Subcritérios Qualitativos Normalizados.....	121
Tabela 13 - Subcritérios Técnicos Normalizados.....	121
Tabela 14 - Subcritérios Econômicos Normalizados	121
Tabela 15 - Subcritérios Sócio-Ambientais Normalizados	121
Tabela 16 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Critérios Principais	123
Tabela 17 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Técnicos	124
Tabela 18 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Econômicos.....	124
Tabela 19 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Sócio-Ambientais.....	124
Tabela 20 - Vetor \tilde{r} : Critérios Principais.....	125
Tabela 21 - Vetor \tilde{w} : Critérios Principais.....	126
Tabela 22 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Técnicos	126
Tabela 23 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Técnicos	126
Tabela 24 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Econômicos.....	127
Tabela 25 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Econômicos.....	127
Tabela 26 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Sócio-Ambientais.....	127
Tabela 27 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Sócio-Ambientais	127
Tabela 28 - Determinação do Vetor w : Critérios Principais	127
Tabela 29 - Vetor w : Critérios Principais.....	128
Tabela 30 - Vetor w : Subcritérios Técnicos	128
Tabela 31 - Vetor w : Subcritérios Econômicos.....	128
Tabela 32 - Vetor w : Subcritérios Sócio-Ambientais.....	128

Tabela 33 - Vetor \tilde{t} : Critérios Principais	129
Tabela 34 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Técnicos	129
Tabela 35 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Econômicos	130
Tabela 36 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Sócio-Ambientais	130
Tabela 37 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Critérios Principais	130
Tabela 38 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Técnicos	131
Tabela 39 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Econômicos	131
Tabela 40 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Sócio-Ambientais	131
Tabela 41 - Valores de $\lambda_{\text{máx}}$, CI , RI e CR : Matrizes de Prioridade Fuzzy	132
Tabela 42 - Ranking por Subcritério (I): Repotenciação da PCH Sodré	133
Tabela 43 - Ranking Final (I): Repotenciação da PCH Sodré	134
Tabela 44 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Critérios Principais	135
Tabela 45 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Técnicos	136
Tabela 46 - Vetor \tilde{r} : Critérios Principais	136
Tabela 47 - Vetor \tilde{w} : Critérios Principais	136
Tabela 48 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Técnicos	136
Tabela 49 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Técnicos	137
Tabela 50 - Vetor w : Critérios Principais	137
Tabela 51 - Vetor w : Subcritérios Técnicos	137
Tabela 52 - Vetor \tilde{t} : Critérios Principais	138
Tabela 53 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Técnicos	138
Tabela 54 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Critérios Principais	138
Tabela 55 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Técnicos	138
Tabela 56 - Valores de $\lambda_{\text{máx}}$, CI , RI e CR : Matrizes de Prioridade Fuzzy	138
Tabela 57 - Ranking por Subcritério (II): Repotenciação da PCH Sodré	139
Tabela 58 - Ranking Final (II): Repotenciação da PCH Sodré	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Percentuais de Ganhos Energéticos obtidos com a Repotenciação.....	48
Quadro 2 - Alternativas de Repotenciação e Ganhos de Potência Estimados.....	50
Quadro 3 - Escala Fundamental de Saaty.....	81
Quadro 4 - Julgamentos: Subcritérios Qualitativos.....	117
Quadro 5 - Matriz de Julgamentos I: Critérios Principais.....	122
Quadro 6 - Matriz de Julgamentos II: Critérios Principais.....	122
Quadro 7 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Técnicos.....	123
Quadro 8 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Técnicos.....	123
Quadro 9 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Econômicos.....	124
Quadro 10 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Econômicos.....	124
Quadro 11 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Sócio-Ambientais.....	124
Quadro 12 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Sócio-Ambientais.....	124
Quadro 13 - Matriz de Julgamentos I/II: Critérios Principais.....	135
Quadro 14 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Técnicos.....	136
Quadro 15 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Técnicos.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.a.	-	ao ano
ABRAGE	-	Associação Brasileira das Grandes Empresas Geradoras de Energia Elétrica
ACP	-	Ação Civil Pública
AHP	-	Processo Analítico Hierárquico (<i>Analytical Hierarchy Process</i>)
AIA	-	Avaliação de Impacto Ambiental
AND	-	Autoridade Nacional Designada
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
AP	-	Ação Popular
BNDES	-	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCC	-	Conta de Consumo de Combustível
CCEAR	-	Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado
CERPCH	-	Centro Nacional de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas
CFURH	-	Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos
CGH	-	Central Geradora Hidrelétrica
CIMGC	-	Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima
CNUMC	-	Comissão das Nações Unidas para a Mudança do Clima
CO ₂	-	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	-	Dióxido de Carbono Equivalente
CONAMA	-	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP 17	-	17 ^a Conferência da Organização das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CR	-	Razão de Consistência (<i>Consistency Ratio</i>)
CT-Energ	-	Fundo Setorial de Energia
DCP	-	Documento de Concepção do Projeto
DNAEE	-	Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica
DNPM	-	Departamento Nacional de Produção Mineral
DSS	-	Sistemas de Suporte à Decisão (<i>Decision Support Systems</i>)
DT	-	Árvore de Decisão (<i>Decision Tree</i>)
EIA	-	Estudo de Impacto Ambiental
EOD	-	Entidade Operacional Designada
EPE	-	Empresa de Pesquisa Energética

FINEL	- Fundo de Financiamento da Eletrobrás
FNDCT	- Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GD	- Geração Distribuída
GEE	- Gases de Efeito Estufa
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMS	- Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ID	- Diagrama de Influência (<i>Influence Diagram</i>)
IEE-USP	- Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo
IPCC	- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LI	- Licença de Instalação
LO	- Licença de Operação
LP	- Licença Prévia
MADM	- Tomada de Decisão por Múltiplos Atributos (<i>Multiple Attribute Decision Making</i>)
MAUT	- Teoria da Utilidade Multiatributo (<i>Multi-Attribute Utility Analysis</i>)
MCDA	- Métodos de Auxílio à Decisão Multicriterial (<i>Multicriteria Decision Analysis</i>)
MCDM	- Métodos de Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios (<i>Multiple Criteria Decision Making</i>)
MCTI	- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDL	- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	- Ministério de Minas e Energia
MODM	- Tomada de decisão com múltiplos objetivos (<i>Multiple Objective Decision Making</i>)
MOLP	- Programação Linear por Múltiplos Objetivos (<i>Multiple Objective Linear Programming</i>)
MRE	- Mecanismo de Realocação de Energia
MUST	- Montante de Uso do Sistema de Transmissão
ONG	- Organização Não Governamental
ONS	- Operador Nacional do Sistema
ONU	- Organização das Nações Unidas
P&D	- Pesquisa e Desenvolvimento
PAC	- Programa de Aceleração do Crescimento

PB	-	Projeto Básico
PB-PCH	-	Projeto Básico de Pequena Central Hidrelétrica
PBA	-	Programa Básico Ambiental
PCH	-	Pequena Central Hidrelétrica
PIB	-	Produto Interno Bruto
PNE 2030	-	Plano Nacional de Energia 2030
PNMA	-	Política Nacional do Meio Ambiente
PNPCH	-	Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas
PNRH	-	Política Nacional de Recursos Hídricos
PROINFA	-	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RAS	-	Relatórios Ambientais Simplificados
RCE	-	Redução Certificada de Emissão
RI	-	Índice Aleatório (<i>Random Index</i>)
RIMA	-	Relatório de Impacto no Meio Ambiente
SEMA	-	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SIN	-	Sistema Interligado Nacional
SODM	-	Tomada de Decisão com Objetivo Único (<i>Single Objective Decision Making</i>)
TEAM	-	Térmicos, Elétricos, Ambientais e Mecânicos
TFSEE	-	Taxa de Fiscalização dos Serviços de Energia Elétrica
TJLP	-	Taxa de Juros de Longo Prazo
UBP	-	Uso de Bem Público
UHE	-	Usina Hidrelétrica
VP	-	Valor Presente
ZTA	-	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do Reservatório	km^2
A_i	Alternativa i da Matriz de Decisão	-
a_{ij}	Dado numérico da Matriz de Prioridade	-
\tilde{A}	Conjunto Fuzzy	-
$\bar{\tilde{A}}$	Complemento do Conjunto Fuzzy \tilde{A}	-
CA	Centróide	-
C_j	Critério j da Matriz de Decisão	-
CI	Índice de Consistência	-
CR	Razão de Consistência	-
EP	Energia Produzida Anualmente	-
FC	Fator de Capacidade	-
FE	Fator de Emissão	$\text{tCO}_2\text{e/MWh}$
FE_{MC}	Margem de Construção	$\text{tCO}_2\text{e/MWh}$
FE_{MO}	Margem de Operação Aproximada	$\text{tCO}_2\text{e/MWh}$
H	Matriz de Decisão dos Critérios	-
H_b	Queda Bruta	m
K	Matriz de Decisão dos Subcritérios	-
l	Extremidade Inferior do Número Triangular Fuzzy	-
m	Número de Alternativas de Repotenciação	-
m	Valor Modal do Número Triangular Fuzzy	-
n	Número de Critérios	-
\tilde{N}	Função de Pertinência	-
P	Potência Instalada	MW
r	Autovetor da Matriz de Prioridade	-
\tilde{r}	Autovetor Fuzzy da Matriz de Prioridade	-
RI	Índice Aleatório	-
t	número de horas por ano	H
\tilde{t}	Vetor de Totalização das Entradas	-
u	Extremidade Superior do Número Triangular Fuzzy	-
w	Prioridade dos Critérios	-
\tilde{w}	Prioridade Fuzzy dos Critérios	-

x	Vetor de Decisão	-
X	Matriz de Decisão de um MCDA	-
X	Conjunto Universo	-
\tilde{Z}	Matriz de Prioridade Fuzzy	-
$\lambda_{\text{máx}}$	Autovalor da Matriz de Prioridade	-
$\mu_{\tilde{A}}$	Função de Pertinência do Conjunto Fuzzy \tilde{A}	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Motivações para elaboração da tese	21
1.2 Contribuições da tese	26
2 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	28
2.1 A evolução histórica das PCHs no Brasil	28
2.2 Análise de oportunidades	31
2.3 Impactos sócio-ambientais	36
3 REPOTENCIAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS	42
3.1 Definição	42
3.2 Análise técnica	45
3.3 Análise econômica	54
3.4 Análise sócio-ambiental	59
3.4.1 Impactos sócio-ambientais	59
3.4.2 O mercado de crédito de carbono	60
3.5 Perspectivas para a repotenciação no Brasil	66
4 MÉTODOS DE AUXÍLIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO	73
4.1 Definição	73
4.2 Processo Analítico Hierárquico	80
4.3 Limitações do método AHP	84
4.4 Teoria dos conjuntos fuzzy aplicada a MCDA	85
5 METODOLOGIA PROPOSTA PARA REPOTENCIAÇÃO DE PCHS	93
5.1 Caracterização do problema	93
5.2 Definição dos critérios	95
5.3 Definição dos conjuntos fuzzy	97
5.4 Descrição do método fuzzy-AHP	103
6 ESTUDO DE CENÁRIOS: REPOTENCIAÇÃO DA PCH SODRÉ	110
6.1 Características da PCH Sodré	110
6.2 Avaliação técnica da PCH Sodré	112
6.3 Cenários de repotenciação	113
6.4 Matriz de decisão	118
6.5 Cenário de Decisão I	122

6.5.1 Prioridade dos critérios	122
6.5.2 Análise de consistência	129
6.5.3 Ranking de decisão	132
6.6 Cenário de Decisão II	135
6.6.1 Prioridade dos critérios	135
6.6.2 Análise de consistência	137
6.6.3 Ranking de decisão	139
7 CONCLUSÃO	141
REFERÊNCIAS	143

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo pretende apresentar quais são as principais motivações e contribuições desta tese que propõe uma metodologia de auxílio à decisão multicritério para ser aplicada em estudos de repotenciação de PCHs.

1.1 Motivações para a elaboração da tese

Tentar prever o que vai acontecer em um determinado mercado não é uma tarefa fácil. Quantificar oferta e demanda, independente da área a que se refere, é sempre uma questão que envolve muitas incertezas. No caso da energia elétrica a previsão desses parâmetros é indispensável, uma vez que esta desempenha um papel fundamental para a sociedade, como elemento chave para o crescimento econômico, inclusão social, desenvolvimento sustentável e, conseqüentemente, melhoria da qualidade de vida da população.

O desenvolvimento econômico do Brasil está embasado tanto no aumento da demanda interna, quanto na perspectiva de maior volume de investimentos necessários para sustentar essa expansão. O consumo de energia elétrica das famílias, as oportunidades ligadas aos setores de infraestrutura e a injeção de recursos envolvendo a realização de importantes eventos esportivos mundiais no país nos próximos anos, são indicadores favoráveis a um cenário positivo de crescimento da economia nacional. Tais fatores econômicos, associados ainda às expectativas de crescimento demográfico, influenciam diretamente nas projeções de consumo de energia elétrica para os próximos anos no país (EPE, 2012).

Com base na taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB), estimada em 4,7% ao ano (a.a.), e de crescimento populacional, de 0,7% a.a., a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima que até 2021 o crescimento médio anual da demanda total de eletricidade no país será de 4,5% a.a., passando de 472 mil GWh em 2011 para 736 mil GWh em 2021 (EPE, 2012). A viabilização da expansão necessária ao adequado atendimento da demanda futura, com baixo custo da energia, implementando programas de eficiência energética, e considerando as questões sócio-ambientais, dentro do conceito do desenvolvimento sustentável, é o maior desafio a ser enfrentado pelo setor energético nacional, nos próximos anos (MME, 2008).

O Brasil é um país privilegiado em termos de disponibilidade de recursos hídricos para o aproveitamento energético. O potencial de geração hidrelétrica no Brasil está estimado em 249 GW dos quais apenas 35% foram aproveitados até o momento (ELETROBRAS, 2011). O

desenvolvimento do potencial remanescente está condicionado, entretanto, aos possíveis impactos sócio-ambientais que podem ocorrer em razão da maior parte do potencial hidrelétrico não explorado estar localizado em áreas de preservação ambiental e territórios indígenas, sobretudo na Amazônia, ou em áreas bastante influenciadas por ocupações antrópicas (EPE, 2008).

Os estudos do Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) sustentam a perspectiva de se ter instalado até 2030 uma potência hidrelétrica de 165 GW (EPE, 2007). Entretanto, o estudo reconhece que são grandes as incertezas que envolvem o aproveitamento do potencial hidrelétrico brasileiro dentro de uma perspectiva de longo prazo, principalmente com relação ao potencial localizado na região amazônica (EPE, 2008).

Atualmente, 972 empreendimentos hidrelétricos são responsáveis por cerca de 70% do suprimento da demanda de energia elétrica no país (ANEEL, 2012). As dificuldades intrínsecas à construção de novos empreendimentos aliadas à grande quantidade de hidrelétricas que compõem a matriz energética, atraem a atenção para a possibilidade de se elevar a oferta de energia no país através da repotenciação dessas usinas que possam estar operando abaixo de sua capacidade de geração, que possuem poços disponíveis para motorização ou mesmo daquelas que, no momento, encontram-se desativadas.

A repotenciação de uma usina geradora de energia elétrica corresponde a todas as obras que podem resultar em ganhos de potência, de rendimento e de vida útil (VEIGA, 2001). Um estudo elaborado pelo Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE-USP) em parceria com a WWF-Brasil aponta que a repotenciação de 67 usinas hidrelétricas (UHEs) em operação há mais de 20 anos pode gerar um ganho em torno de 8 GW ao parque gerador nacional (BERMANN et al., 2004).

Segundo estimativas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a potência disponível para motorização de poços existentes no Sistema Interligado Nacional (SIN) é de aproximadamente 5,2 GW, considerando a produtividade de cada usina a 65% do volume útil. Muito embora a instalação de novas unidades geradoras nos poços existentes ou o aumento do rendimento das unidades em operação possam não trazer significativo incremento de energia firme, o que se observa é que a potência adicional teria condições de ser utilizada nos períodos de afluência média e alta, podendo trazer ganhos econômicos e de confiabilidade na operação do SIN (ANEEL, 2011).

Diferentemente da abordagem dos estudos mencionados anteriormente, este trabalho pretende destacar a importância da repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), visto que tais usinas apresentam uma concepção técnica mais simples, diversos incentivos

legais e econômicos e reduzidos impactos sócio-ambientais. Como, na maioria das vezes, localizam-se próximas aos centros de consumo, essas usinas podem ser consideradas agentes de geração distribuída (GD), aumentando a confiabilidade do sistema, reduzindo os investimentos e as perdas em linhas de transmissão, além de desempenharem importante papel no desenvolvimento das comunidades locais (GYORI, 2007).

Um estudo publicado em 2003 pela Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia verificou ser possível adicionar, aproximadamente, 680 MW de capacidade ao parque gerador nacional apenas com a repotenciação e reativação das PCHs no Brasil (MACEDO, 2003). Segundo Bianchi e Souza (2003), somente no estado de São Paulo o ganho seria de 117 MW como resultado da repotenciação de 94 PCHs, sendo que aproximadamente 40% desse montante referem-se a centrais desativadas.

Diante do cenário político-econômico que se estabeleceu mundialmente, no qual as tomadas de decisões primam por favorecer as questões de sustentabilidade, o planejamento energético nacional deveria avaliar com maior precisão a real contribuição da repotenciação dessas usinas para o atendimento à demanda futura, visto que atualmente existem 421 PCHs em operação e, aproximadamente, 600 centrais desativadas no país, representando um grande potencial a ser explorado (TIAGO FILHO et al., 2006a).

Em 1941, um levantamento do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), intitulado “Utilização de Energia Elétrica no Brasil”, registrou a existência de 888 PCHs e 1.128 pequenas unidades geradoras, com até 1 MW de potência (ELETROBRAS, 2000). Com o passar dos anos, muitas PCHs deixaram de existir ou foram desativadas. A maioria dessas pequenas centrais que ainda estão em funcionamento no país é passível de repotenciação por estarem operando abaixo de sua capacidade real de geração, seja pelo subdimensionamento no projeto original, seja pela obsolescência da instalação e dos equipamentos (BIANCHI; SOUZA, 2003).

Com o objetivo de avaliar as perspectivas quanto ao mercado de PCH no Brasil, o Centro Nacional de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH) tem desenvolvido uma série de trabalhos de estimativa de potencial. A partir dos estudos desenvolvidos, estima-se um potencial teórico ainda não inventariado em torno de 15 GW, que somado ao potencial conhecido de aproximadamente 28 GW resulta em um potencial total de 43 GW disponíveis para implantação de PCHs no Brasil (MALDONADO et al., 2011). Entretanto, apenas 9% desse valor estão resultando em energia efetivamente gerada por essas centrais no país. Existem mais de 900 projetos básicos de PCHs em trâmite na

ANEEL, que se somados representam cerca de 8 GW a serem adicionados no parque gerador nacional.

Diante do exposto, verifica-se que há uma tendência de aumento gradativo da participação das PCHs no parque gerador nacional, tornando o mercado de repotenciação desse tipo de usina cada vez mais aquecido. E com base nesta expectativa é que se verifica a utilidade da nova metodologia de auxílio à decisão multicritério proposta neste trabalho para ser aplicada em estudos de repotenciação de PCHs. Essa metodologia se baseia no Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchy Process – AHP*) e considera os atributos técnicos, econômicos e sócio-ambientais dos tipos de repotenciação possíveis de serem implementados na usina em estudo, utilizando a lógica *fuzzy* no tratamento das variáveis de caráter lingüístico.

O referencial teórico que dá suporte ao desenvolvimento deste trabalho remete-se a diversos estudos sobre métodos de decisão aplicados com o objetivo de selecionar, sob uma determinada situação, o melhor tipo de fonte de energia elétrica a partir de seus critérios técnicos, econômicos, ambientais ou sociais. Mamlook; Akash e Mohsen (2001), por exemplo, utilizam o sistema neuro-*fuzzy* para comparar as fontes de geração e determinar a melhor política energética a ser adotada na Jordânia, visto que, atualmente, as termelétricas predominam a geração de energia elétrica neste país. A partir da metodologia aplicada definiu-se que a energia solar é a que tem o menor custo e o maior benefício para gerar energia na Jordânia, seguida da hidrelétrica e eólica. A pior fonte é a nuclear, que envolve alto custo de implantação e baixa segurança, seguida da termelétrica.

Analogamente, Kahraman; Kaya e Cebi (2009) associam a lógica *fuzzy* a outras duas metodologias: AHP e Projeto Axiomático, separadamente, para determinar a fonte renovável mais indicada para gerar energia elétrica na Turquia. A metodologia proposta é estruturada em quatro critérios principais: técnico, econômico, ambiental e sócio-político, compostos por 17 subcritérios. Apesar dos procedimentos dos cálculos serem diferentes nas duas metodologias, os resultados obtidos foram os mesmos, sendo que a geração eólica ocupou a primeira posição do *ranking*, seguida da solar, biomassa, geotérmica e hidrelétrica, nessa ordem de prioridade.

Seguindo a linha de pesquisa de Métodos de Auxílio à Decisão Multicritério (*Multicriteria Decision Analysis - MCDA*), Zangeneh; Jadid e Rahimi-Kian (2009) apresentam um modelo de avaliação para a priorização de tecnologias de GD, convencionais e renováveis, para atender o aumento da demanda devido à taxa de crescimento no Irã, considerando a questão do desenvolvimento sustentável. A estratégia de tomada de decisão

hierárquica adotada pelos autores é apresentada tanto do ponto de vista da empresa de distribuição, quanto do produtor independente de energia. O método AHP é utilizado no estudo de caso que avalia a melhor alternativa de GD para sete regiões do Irã, a partir de critérios econômicos, técnicos e ambientais, levando em consideração também a disponibilidade de energia nessas localidades. O estudo mostrou que em algumas regiões a turbina eólica é a melhor tecnologia, enquanto em outras a melhor é a turbina a gás. Entretanto, verificou-se que os resultados podem ser alterados de acordo com a variação do peso dos critérios.

Chatzimouratidis e Pilavachi (2008) também demonstraram a influência dos pesos dos critérios nos resultados de uma análise MCDA a partir do AHP, ao avaliar o impacto global da implantação de dez tipos de usinas geradoras de energia elétrica sobre o padrão de vida das comunidades locais. Os critérios selecionados foram: qualidade de vida e aspectos sócio-econômicos, e a variação dos pesos ocorreu em três etapas: 1) 75% para qualidade de vida e 25% para aspectos sócio-econômicos; 2) 50% para cada critério; 3) inverteu-se o peso dos critérios do 1º. caso. Em todas as simulações, as fontes renováveis ocuparam as cinco primeiras posições no *ranking*, mantendo fixa a liderança das usinas geotérmicas. No primeiro caso a nuclear ficou com a sexta colocação, enquanto no terceiro caso esta veio a ocupar a última posição no *ranking*. No primeiro e no segundo caso as térmicas a óleo e a carvão ocuparam a penúltima e última posição, respectivamente. A aplicação do método confirmou a opinião da população de que as usinas de energia renovável asseguram melhores condições no padrão de vida. Esses mesmos autores publicaram outro trabalho em 2009, aplicando o mesmo método de decisão a cerca dos mesmos dez tipos de usinas, só que analisando outros dois aspectos: econômico e tecnologia/sustentabilidade. Entretanto, em tal trabalho não houve variação no peso dos critérios, considerando 75% para tecnologia/sustentabilidade, como forma de garantir o desenvolvimento sustentável. Neste caso, as hidrelétricas ocuparam a primeira posição no *ranking*, seguida das demais fontes de energia renováveis. (CHATZIMOURATIDIS; PILAVACHI, 2009).

A revisão da literatura realizada por Wang et al. (2009) apresenta uma avaliação dos métodos e dos critérios (técnicos, econômicos, ambientais e sociais) mais utilizados em tomadas de decisão sobre geração de energia sustentável. O trabalho concluiu que eficiência, custo de investimento, emissão de CO₂ e a criação de emprego são os critérios mais utilizados nos atributos técnico, econômico, ambiental e social, respectivamente. Custo de investimento é o principal, seguido da emissão de CO₂. Os métodos objetivos e de ponderação combinada tendem a ser mais aplicados em energia sustentável, pois não depende de especialistas. Os

MCDA têm ampla aplicação e, apesar do predomínio do método AHP tradicional, muitos pesquisadores têm unido lógica *fuzzy* a diversas metodologias, pelo fato da mesma tratar com critérios qualitativos. Constatou-se também, que a aplicação de diferentes métodos MCDA em um problema pode resultar em diferentes *rankings* de decisão, sendo aconselhável aplicar mais de um método para comprovar o resultado.

Com base nos trabalhos mencionados e no cenário energético do Brasil, têm-se como principais questões motivadoras para a realização deste trabalho:

- A forte tendência mundial de valorização cada vez maior das fontes renováveis de energia;
- A utilização cada vez mais freqüente de MCDAs como ferramenta eficaz de auxílio à decisões relacionadas a planejamento energético;
- A previsão de crescimento no consumo de energia elétrica no Brasil de 4,5% a.a. para os próximos dez anos;
- A necessidade de elevar a oferta de energia e aumentar a confiabilidade do sistema para evitar a ocorrência de uma crise energética no país;
- A dificuldade de se construir novos empreendimentos energéticos, principalmente de grande porte, devidos aos impactos sócio-ambientais intrínsecos aos mesmos;
- A previsão do aumento da participação de usinas termelétricas no atendimento à demanda futura, tornando a geração mais cara e menos sustentável;
- A abundância de recursos, domínio tecnológico e incentivo legal no que diz respeito à implantação de PCHs no Brasil;
- A grande quantidade de PCHs desativadas ou subutilizadas no país.

1.2 Contribuições da tese

Um dos principais objetivos desta tese é incentivar o aproveitamento do grande potencial existente para as PCHs no Brasil, propondo uma metodologia multicriterial *fuzzy*-AHP capaz de proporcionar maior praticidade e confiabilidade à tomada de decisão sobre o tipo de repotenciação mais apropriado para ser realizado nessas usinas, a partir de parâmetros técnicos, econômicos e sócio-ambientais característicos do empreendimento e pré-estabelecidos por especialistas no assunto.

A validação da metodologia é demonstrada no trabalho a partir de sua aplicação no estudo de caso de repotenciação da PCH Sodré, localizada no município de Guaratinguetá e que se encontra desativada desde 1992. Em cada um dos dois cenários de decisão propostos, um priorizando fortemente os aspectos econômicos e o outro retratando uma situação de crise

energética, o método *fuzzy-AHP* retorna o tipo de repotenciação mais apropriado para ser realizado na Sodré.

Ampliando o campo de análise, se forem definidas todas as PCHs candidatas à repotenciação no Brasil e determinados os tipos a serem realizados em cada uma delas, é possível estimar a real contribuição deste empreendimento em relação à: extensão da vida útil das usinas, aumento da sua confiabilidade, segurança no controle e no fornecimento de ponta, redução dos custos de manutenção e da dependência da geração termelétrica, além de um eventual aumento da energia assegurada e da potência efetiva do parque gerador brasileiro. Tais benefícios podem colaborar muito para o atendimento à demanda de energia elétrica futura com redução de riscos, custos, tempo de implementação e impactos sócio-ambientais.

Diante do exposto, é evidente a utilidade da metodologia proposta nesta tese, principalmente sob uma perspectiva de planejamento energético, incentivando o crescimento do mercado de repotenciação de PCHs e, assim, contribuindo para manter a matriz de energia elétrica brasileira como uma das mais limpas do mundo.

2 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Este capítulo apresenta um panorama geral das PCHs no Brasil, abordando a sua evolução histórica, como são definidas pela ANEEL, o potencial existente para a implantação dessas usinas, bem como seus aspectos legais, institucionais, mercadológicos e sócio-ambientais.

2.1 A evolução histórica das PCHs no Brasil

As centrais hidrelétricas surgiram no Brasil em 1883, quando se deu a instalação do primeiro aproveitamento hidrelétrico na mineração Santa Maria em Diamantina, denominado “Ribeirão do Inferno”, tendo prosseguimento no ano de 1889, quando foi instalada a Usina Bernardo Mascarenhas: primeira hidrelétrica de pequeno porte, com 250 kW para atender à sua indústria têxtil e alimentar a iluminação residencial de Juiz de Fora, constituindo o que poderia ser denominado como a primeira empresa de energia elétrica para serviço público (TIAGO FILHO et al., 2006b).

As usinas hidrelétricas instaladas principalmente na primeira metade do século passado, foram construídas por pequenos empresários ou pelas prefeituras municipais com o objetivo de atender sistemas isolados. De 1920 a 1930, este processo teve uma rápida expansão e o número de empresas passou de 306 para 1.009, todas operando pequenos aproveitamentos hidrelétricos. Em 1930, os estados de Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina registravam 519 centrais hidrelétricas em operação, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 656 MW (BERMANN et al., 2004). Este crescimento continuou até a década de 40, porém em taxas menores que nas décadas anteriores. Em 1941, com exceção dos grupos estrangeiros existentes, somente oito empresas possuíam potência instalada superior a 3 MW, podendo-se verificar que quase todas as instalações do país eram compostas por PCHs (TIAGO FILHO et al., 2006b).

Em 1980 o Ministério de Minas e Energia (MME) criou o Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PNPCH) promovendo estudos, cursos, subsídios técnicos e legais para incentivar a implantação dessas centrais, principalmente por autoprodutores nos sistemas isolados do Norte do Brasil. Entretanto, o programa não teve o sucesso esperado por conta da recessão econômica que o país atravessava aliada às preferências pelos grandes blocos de geração, pela extensão das linhas de transmissão e pela geração térmica, sendo esta última motivada pelo fato de que os grupos de geradores eram mais baratos.

A primeira definição de PCH na legislação do setor elétrico ocorreu em 1982, através da Portaria 109 do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) que a caracterizava da seguinte forma (CONCEIÇÃO, 2007):

- Operação a fio d'água ou, no máximo com regularização diária;
- Barragens e vertedouros com altura máxima de 10 metros;
- Sem utilização de túneis;
- Estruturas hidráulicas no circuito de geração para vazão turbinável de 20 m³/s, no máximo;
- Unidades geradoras com potência individual de até 5 MW;
- Potência instalada total de, no máximo, 10 MW.

Persistindo as dificuldades para o desenvolvimento de um programa de incentivo as pequenas hidrelétricas, devido a falta de incentivo do mercado e a carência de linha de crédito para o setor, a Portaria DNAEE 136, de 6 de outubro de 1987 redefiniu o conceito de PCH, mantendo apenas as características associadas à potência total de 10 MW e com unidades geradoras de, no máximo 5 MW. Em 1997, sucessivas medidas provisórias elevaram o limite máximo de potência instalada das PCHs para 25 MW, até que em 27 de maio de 1998, através da Lei 9.648, esse limite foi finalmente fixado em 30 MW (CONCEIÇÃO, 2007).

Juntamente com estas alterações na caracterização das PCHs no final da década de 1990 foi criada a ANEEL, em 26 de dezembro de 1996, com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as Políticas e Diretrizes do Governo Federal.

A ANEEL, através da Lei 9.427 e da resolução 394, de 4 de dezembro de 1998, estabeleceu como critérios para o enquadramento de empreendimentos hidrelétricos como PCHs, potência superior a 1 MW e igual ou inferior a 30 MW, com área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km², revogando as portarias DNAEE 125 e 136, que tratavam de amenizar o enquadramento e as condicionantes para a implantação das usinas (ANEEL, 1998). Estabeleceu-se também, deste modo, as centrais geradoras hidrelétricas¹ (CGHs) como sendo as usinas com potência instalada de até 1 MW.

Em 1998, a ANEEL criou um programa de fiscalização de todas as centrais de geração de eletricidade do setor público existentes no país e, em 1999, a fiscalização foi estendida ao setor privado, envolvendo os autoprodutores e os produtores independentes. O resultado indicava a existência de 325 PCHs em operação, com capacidade de 815,6 MW e nove PCHs

¹Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticia.cfm?Identidade=3963&id_area=90>. Acesso em: 03 mar. 2012.

fora de operação, deixando de ofertar 23,5 MW. Comparando com os registros de PCHs em 1930, constatou-se que, no mínimo, 185 PCHs encontravam-se em situação desconhecida (BERMANN et al., 2004).

Atualmente, está em vigor a Resolução da ANEEL nº. 652, de 09 dez. 2003, que define as PCHs como sendo usinas com potência instalada desde 1 MW até 30 MW, destinado a produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área do reservatório igual ou inferior a 3,0 km². O aproveitamento hidrelétrico que não atender a condição para a área do reservatório de até 3,0 km², respeitados os limites de potência e modalidade de exploração, será considerado com características de PCH se ficar comprovado que o dimensionamento do reservatório foi baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica ou se a inequação (1) for atendida (ANEEL, 2003):

$$A \leq 14,3 \times \frac{P}{H_b} \quad (1)$$

sendo:

P = potência elétrica instalada em (MW);

A = área do reservatório em (km²), limitada para esta condição em até 13 km²;

H_b = queda bruta em (m), definida pela diferença entre os níveis d'água máximos normal de montante e normal de jusante;

A partir de dados obtidos através do *site* da ANEEL em abril de 2011, apresentados na Tabela 1, foi feito um levantamento do potencial conhecido para a implantação de PCHs no Brasil (MALDONADO et al., 2011).

Tabela 1 - Potencial de Implantação de PCHs no Brasil (Adaptado de: MALDONADO et al., 2011).

SITUAÇÃO	QUANTIDADE	POTÊNCIA (MW)
BACIAS HIDROGRÁFICAS INVENTARIADAS	1.266	13.326,63
PB-PCH-ANÁLISE CONCLUÍDA	39	414,33
PB-PCH-ANÁLISE CONCLUÍDA/OUTORGADO	48	674,38
PB-PCH-ANÁLISE NÃO INICIADA	331	3.100,59
PB-PCH-ANÁLISE PARALISADA	2	18,50
PB-PCH-APROVADO/ENCAMINHADO PARA FASE DE OUTORGA	74	881,24
PB-PCH-EM ACEITE	41	151,39
PB-PCH-EM ANÁLISE	60	636,46
PB-PCH-EM COMPLEMENTAÇÃO	55	534,60
PB-PCH-EM ELABORAÇÃO	326	1.605,45
PCH OUTORGADA ENTRE 1998-2010	149	2.056,46
PCH EM CONSTRUÇÃO	52	683,25
PCH EM OPERAÇÃO	398	3.537,13
POTENCIAL TOTAL PARA IMPLANTAÇÃO DE PCHS NO BRASIL (MW)		27.620,41

Observa-se que o potencial total conhecido se aproxima dos 28 GW, sendo que apenas 12,8% desse valor resultam em energia efetivamente gerada pelas PCHs no país. De acordo com a Tabela 1, em abril de 2011 existiam 976 Projetos Básicos de PCHs (PB-PCH) em trâmite na ANEEL, que somados representam cerca de 8 GW a serem adicionados no sistema elétrico brasileiro. A partir dos estudos desenvolvidos pelo CERPCH, estima-se que o potencial teórico ainda não inventariado no Brasil para implantação de PCHs é algo em torno de 15 GW, que somado ao potencial conhecido resulta em um potencial total de 43 GW (MALDONADO et al., 2011). Atualmente, esse montante representa 37% da potência total fiscalizada no parque gerador nacional, sendo que o aproveitamento desse potencial significativo existente para implantação de PCHs pode ajudar o Brasil a manter a matriz elétrica como uma das mais limpas do mundo (ANEEL, 2012).

2.2 Análise de oportunidades

Diante das dificuldades encontradas na implementação de grandes centrais hidrelétricas, principalmente nas proximidades dos centros consumidores, quer seja por falta de investimentos, impacto ambiental ou esgotamento dos recursos hídricos, torna-se fundamental a valorização das pequenas centrais hidrelétricas.

A atratividade destas usinas fundamenta-se, principalmente, por suas características de menor impacto ambiental, menor volume de investimentos, curto prazo de maturação e incentivos por parte da regulamentação vigente (MALDONADO et al., 2006).

Segundo ANEEL (2010), ANEEL (2012) e Santos (2008), atualmente, os principais incentivos legais e econômicos direcionados às PCHs no Brasil são:

- Simplificação no processo de obtenção da concessão, com a dispensa de licitação, bastando o empreendedor obter outorga de autorização. Essa autorização não é onerosa e evitam-se os riscos inerentes à participação em processos de leilões de potencial (Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996);
- Possibilidade de apresentar Relatórios Ambientais Simplificados (RAS) para a solicitação do licenciamento ambiental, no caso de obra considerada de baixo impacto ao meio ambiente (Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 279, de 27 de junho de 2001);
- Desconto igual ou superior a 50% nos encargos de uso dos sistemas de transmissão e distribuição, sendo que as PCHs que entraram em operação até 2003 são isentas destes encargos (Resolução ANEEL nº 281, de 10 de outubro de 1999);

- Livre comercialização de energia para consumidores de alta tensão com carga igual ou superior a 500 kW (Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 2006);
- Comercialização da energia gerada com agentes de distribuição, sob o rótulo de geração distribuída, com limite tarifário definido pela ANEEL (Resolução Normativa ANEEL nº 167 de 10 de outubro de 2005);
- Isenção relativa à Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos (CFURH) (Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996);
- Isenção de pagamento de Uso de Bem Público (UBP) (Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998);
- Isenção da obrigação de aplicar, anualmente, o montante de, no mínimo, 1% de sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do Setor Elétrico (Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000);
- Participação no rateio da Conta de Consumo de Combustível (CCC), quando substituir geração térmica a óleo diesel, nos sistemas isolados (Resolução Normativa ANEEL nº 146, de 14 de fevereiro de 2005);
- Possibilidade de adesão ao Mecanismo de Realocação de Energia (MRE), para redução dos riscos hidrológicos dentro do sistema interligado;
- Possibilidade de se optar pelo regime de tributação pelo lucro presumido;
- Possibilidade de obtenção de créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL);
- Possibilidade de se beneficiarem dos incentivos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do Governo Federal;
- Possibilidade de vender energia nos leilões específicos para fontes alternativas promovidos pelo MME e organizados pela ANEEL;
- Possibilidade de vender energia diretamente à distribuidora por meio de Chamada Pública;
- Possibilidade de compensação no consumo de energia elétrica ativa (descontos na fatura de energia), caso o consumidor que possua uma CGH injete na rede elétrica a sua energia sobressalente. Esses créditos têm validade de 36 meses a contar da data do faturamento, sendo que após esse prazo, o eventual saldo será revertido à modicidade tarifária (Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012);
- No caso de investidores privados, atualmente encontra-se disponível junto ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) uma linha específica de financiamento para PCHs com custo de operação direta composto por: de 0,9% ao ano

(a.a.) mais Taxa de Juros de Longo Prazo² (TJLP) mais Taxa de Risco de Crédito³ de 0,5% a.a. (para fiança garantida com fiança bancária), com limite máximo de participação de 80% do orçamento e prazo máximo de amortização de 16 anos, com carência de até seis meses após o início da operação comercial (TOVAR, 2011);

- No caso de empresas estatais, o financiamento para PCHs pode ser feito na modalidade conhecida internacionalmente como “*Project Finance*”, em que o fluxo de caixa futuro do próprio empreendimento é subscrito em garantia do empréstimo, sendo que este deve se apresentar com alto grau de confiabilidade para se constituir em plena garantia, e ser aceita pelo agente financiador.

O maior programa brasileiro criado pelo governo para aumentar a participação de PCHs e outras fontes renováveis de energia no parque gerador nacional, devido às preocupações com as questões ambientais ligadas à geração de energia elétrica, foi o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), gerenciado pela Eletrobrás, instituído pela Lei 10.438 de abril de 2002, e revisado pela Lei 10.762, de novembro de 2003 (ELETROBRAS, 2007a). A energia produzida pelas usinas do PROINFA, que corresponde a 3,6% do consumo total anual do país, terá a garantia de compra pela Eletrobrás por um período de 20 anos. Dos 3.299,4 MW que foram contratados pela Eletrobrás, por meio do PROINFA, 1.191,2 MW são de 63 PCHs; 1.422,9 MW são de 54 usinas eólicas; e 685,2 MW são de 27 usinas a base de biomassa. A princípio, os 144 projetos iniciariam a operação até dezembro de 2008. Entretanto, este prazo foi prorrogado três vezes, até se encerrar em definitivo em dezembro de 2011. De todos os empreendimentos inscritos no PROINFA, nove (duas eólicas, seis térmicas e uma PCH) não atenderam o cronograma e tiveram o contrato rescindido, representando uma baixa de 285 MW do que havia sido previsto inicialmente (POLITO, 2012). Em uma avaliação geral, as PCHs apresentaram o melhor resultado do programa se comparado às outras fontes alternativas de energia, pois a ANEEL também solicitou a rescisão dos contratos somente da PCH Cachoeira Grande (MG), de 10 MW.

Na última década, as PCHs apresentaram um crescimento significativo, passando de 303 empreendimentos gerando 855 MW em 2001 para 783 PCHs e CGHs em 2012 responsáveis pela geração de 4.094 MW (ANEEL, 2012). Neste período, o setor se

² A Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP) foi instituída pela Medida Provisória nº 684, de 31.10.94, publicada no Diário Oficial da União em 03.11.94, sendo definida como o custo básico dos financiamentos concedidos pelo BNDES. Para o trimestre janeiro a março de 2012 o valor está fixado em 6% a.a. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Custos_Financeiros/Taxa_de_Juros_de_Longo_Prazo_TJLP/>. Acesso em: 03 mar. 2012.

³ Taxa de Risco de Crédito é a taxa referente ao risco de *default* ou de reduções no valor de mercado causada por trocas na qualidade do crédito do emissor ou contraparte. Disponível em: <http://w3.impa.br/~zubelli/RISK/risco_de_cred.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2012.

desenvolveu e estruturou uma cadeia produtiva sólida, com *know-how* e tecnologias totalmente nacionais direcionadas às PCHs. Apesar das inúmeras vantagens técnicas, dos inúmeros empreendedores dispostos a investir nesta fonte de energia limpa e do enorme potencial ainda existente, as PCHs vem perdendo competitividade para outras fontes de energia renovável (LENZI, 2011).

O custo de construção das PCHs atualmente supera o de outras fontes de energia, como biomassa e eólica. Basicamente, 50% dos custos de construção estão relacionados a obras civis, cujo setor está fortemente aquecido no país, pressionando os preços para cima. Os outros 50% são os custos relacionados aos equipamentos eletromecânicos, que para as PCHs não têm a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) como ocorre para as eólicas. Sem contar as diferenças existentes nas condições de financiamento e o longo ciclo de maturação dos projetos, que podem demorar cinco anos para as PCHs, enquanto outras fontes chegam a concluir o processo em até oito meses.

Apesar de se caracterizar uma fonte de energia limpa, o licenciamento ambiental das PCHs não é tão simples quanto se presume e tem sido um dos principais responsáveis pelo atraso nos processos de outorga. Segundo Alvarenga et al. (2006), a maioria dos problemas identificados junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) são de caráter burocrático, tais como:

- Aumento da demanda dos processos e com isso, necessidade de criação de uma diretoria específica para licenciamento ambiental;
- Quantidade de recursos humanos e materiais, gerando desistência de empreendedores ou liberação de licenças de forma inadequada;
- Diversidade de leis, decretos e resoluções versando sobre o mesmo assunto, o que gera dúvidas na sua interpretação e sobre a qual órgão recorrer. São contabilizados 828 dispositivos legais e administrativos que relacionam somente o meio ambiente ao setor elétrico (ALVES; YAMAGUSHI; BRAUN, 2008).

Do ponto de vista do empreendedor, as dificuldades relacionadas são (ALVARENGA et al., 2006):

- O IBAMA enxerga a questão dos impactos apenas pelo lado do meio ambiente, não pelo aspecto sócio-econômico;
- Mesmo tendo cumprido todas as exigências do Estudo e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), e estando de posse das devidas licenças, o projeto ainda por vir a ser suspenso por ações públicas;

- As licenças podem ser revogadas a qualquer momento pela superveniência de graves riscos ambientais e de saúde.

Estas razões são suficientes para demonstrar o porquê do insucesso das PCHs nos leilões de venda de energia, de acordo com a metodologia atual, que privilegia o preço de energia ofertado (LENZI, 2011). No 12º Leilão de Energia Nova (A-3) e 4º Leilão de Energia de Reserva realizado em agosto de 2011, nenhuma PCH foi negociada. Esses projetos disputaram na modalidade quantidade de energia, concorrendo com o projeto de expansão da UHE Jirau, que vendeu sua energia ao preço teto de 102,00 R\$/MWh, definido para o empreendimento, o que dificultou a venda de energia das PCHs. O destaque ficou para as eólicas que negociaram aproximadamente 2 GW provenientes de um total de 78 projetos, a um preço médio de 99,56 R\$/MWh (Leilão A-3 e Leilão de Energia de Reserva de 2011, 2011). Os investidores em PCHs alegam dificuldades para viabilizar uma usina nessa faixa de preço, sendo necessário algo na casa dos 150,00 R\$/MWh.

Segundo Galhardo (2011), pesquisadores acreditam que as PCHs estão perdendo competitividade por não estarem recebendo a mesma atenção dos órgãos responsáveis pelos incentivos às energias renováveis. Diferentemente da eólica e da biomassa, o Brasil detém *know-how* em PCHs, existem séries de dados hidrológicos consistidos de longo prazo, com mais de 50 anos, o que faz com que a garantia de fornecimento da energia oriunda das PCHs seja bastante confiável frente à eólica, cujos parques atualmente são dimensionados com série de dados que dificilmente ultrapassam três anos. Como o foco das eólicas está nos leilões do governo, é possível afirmar que este tem assumido o risco do fornecimento de energia oriunda dessa fonte, caso venha faltar. A qualidade e a garantia de fornecimento da energia gerada pelas PCHs no Brasil são muito superiores à da eólica e o mercado de energia tem que atentar para este aspecto.

Pode parecer estranho, mas a perda de competitividade das PCHs é uma vantagem se o foco estiver no mercado de crédito de carbono. No contexto da Organização das Nações Unidas (ONU), as PCHs são consideradas fontes renováveis de energia e, quando conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), cada MWh produzido pela usina pode ser convertido em créditos de carbono. Ambientalmente, a geração de um crédito de carbono significa que a PCH contribuiu para reduzir a emissão de uma tonelada de dióxido de carbono que seria emitido pelo SIN devido à operação de usinas termelétricas que queimam combustíveis fósseis (GYORI, 2007).

Os créditos de carbono podem representar de 3% a 5% do faturamento anual dos empreendimentos e, quanto mais justificada for a importância desses créditos de carbono para

a viabilização econômica da construção de uma PCH, maior é a probabilidade de obtê-los. Isto significa que quanto menos favorável for o cenário para investimentos em PCHs, mais facilmente serão aprovados os projetos de créditos de carbono para esses empreendimentos, por isso a perda de competitividade pode contribuir (MACHADO; PEDROSO, 2011).

O momento é propício para o setor de PCHs desenvolver projetos de créditos de carbono, que além de resultar em incentivos significativos que podem melhorar a sua competitividade diante de outras fontes de energia, também apresenta um alto potencial para desenvolver o mercado de carbono no Brasil e atrair a atenção de investidores deste mercado para a América Latina (MACHADO; PEDROSO, 2011).

2.3 Impactos sócio-ambientais

Problemas como o aquecimento global, desastres ecológicos, populações vivendo em condições subumanas, tem alertado o mundo todo da necessidade de se quebrar paradigmas e buscar, sem perda de tempo, a proteção e manutenção dos sistemas naturais que ainda restam, como garantia da própria vida. Profundas mudanças devem ocorrer nos sistemas de produção, na utilização dos recursos naturais e na organização da sociedade (GYORI, 2007).

Não é difícil identificar que os problemas ambientais estão intimamente ligados ao desenvolvimento econômico. O capitalismo estimula o crescimento econômico exagerado, implicando, na maioria das vezes, na exploração descontrolada dos recursos naturais, uso de tecnologia em larga escala e consumo desenfreado. O desperdício e a degradação do meio ambiente acabam fazendo parte deste cenário, de modo que a água e o ar já vêm sendo tratados como recursos naturais em extinção. O fato de que sem os recursos naturais não existirá vida, levou o mundo a pensar na questão da sustentabilidade do desenvolvimento, exigindo uma revisão das estratégias e tecnologias adotadas pelos países e dos padrões de consumo e estilos de vida da sociedade moderna (DARZÉ, 2002).

A demanda de energia elétrica, sendo uma resposta ao desenvolvimento econômico ascendente, vem exigindo a expansão do parque gerador nacional para que no futuro não ocorra uma crise no setor. Em muitos casos, os meios de geração de energia elétrica implicam em degradação do meio ambiente. Dependendo do empreendimento, os impactos negativos adquirem maiores proporções no período de sua construção, enquanto outros também são agressivos durante todo o período de operação.

Os impactos ambientais mais significativos e complexos associados às hidrelétricas ocorrem durante sua fase de implantação, sendo verificados ao longo e além do tempo de vida

da usina e do projeto, bem como ao longo do espaço físico envolvido. Considerando a implantação de PCHs, apesar de apresentar proporção bastante reduzida se comparado às hidrelétricas de grande porte, podem ser verificados os seguintes impactos sócio-ambientais (AGUILAR, 2011; MALDONADO et al., 2011; REIS, 2001):

- Início ou aceleração dos processos erosivos, devido aos movimentos naturais do espelho do reservatório nas fases de enchimento do lago e de operação do empreendimento;
- Perda de habitat, tanto da fauna terrestre quanto na fauna aquática, devido às obras civis e à construção do reservatório.
- Alterações na fauna aquática a montante da barragem, causada pela diminuição da correnteza, pela diferença de temperatura entre o fundo do lago e a superfície do lago que propiciam a proliferação de matérias orgânicas e vegetais, que em decomposição causam a diminuição do oxigênio da água;
- Alteração na qualidade da água do reservatório, que ocorre por causa da decomposição orgânica mencionada anteriormente, favorecendo a emissão de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono e o metano e gerando compostos nocivos à saúde humana, aumentando o risco de doenças de natureza endêmica;
- Desprendimento de metano na atmosfera, que é um gás de efeito estufa vinte vezes mais agressivo do que o dióxido de carbono (CO₂), devido à matéria orgânica em decomposição no fundo do reservatório;
- Comprometimento de rotas migratórias, relacionado à barreira física introduzida com a implantação da barragem que cria um fator de isolamento para populações e espécies aquáticas que antes viviam em contato e impede ou dificulta a piracema de algumas espécies de peixes;
- Comprometimento da pesca local devido aos impactos sofridos pela fauna aquática em função da construção do reservatório;
- Construção de linhas de transmissão sobre as florestas e reservas ecológicas;
- Interferências de áreas de autorização e concessões minerais com reservatório;
- Grandes quantidades de terras cultiváveis, sítios históricos e reservas ambientais submersas pela construção do reservatório;
- Intensificação do tráfego nas rodovias vicinais que afluem à região de implantação da usina, danificando as estradas e aumentando a produção de gases de efeito estufa oriundos de veículos automotores;
- Interferência e conflitos referentes aos aspectos paisagistas;

- Geração de expectativas em relação à implantação da usina, causando mudança na rotina das comunidades locais;
- Deslocamento compulsório das populações ribeirinhas, promovido pelas obras de instalação da usina, que na maioria das vezes é acompanhado por compensações financeiras irrisórias ou inexistentes e o processo de reassentamento, não assegura a manutenção das condições anteriores de vida dessas pessoas;
- Aumento nos custos dos serviços públicos, das taxas e dos impostos, no ressarcimento de desapropriações.

É importante destacar que no caso de PCHs, cujo reservatório seja de pequena proporção ou se tratando de uma usina a fio d'água, alguns dos impactos mencionados são bastante amenizados, podendo nem mesmo vir a existir. Entretanto, independentemente do tipo de usina, é necessário que haja uma gestão ambiental eficiente desde a etapa do projeto, passando pela fase de construção e que continue ao longo da vida útil da usina, de modo a identificar, hierarquizar e caracterizar a fase de ocorrência dos respectivos impactos, para que sejam propostos programas de mitigação com o objetivo de eliminá-los ou, pelo menos, minimizá-los (AGUILAR, 2011).

A análise de viabilidade de projetos de PCHs não deve ater-se apenas aos aspectos negativos, mas deve contemplar também os benefícios que o empreendimento pode proporcionar, tais como (AGUILAR, 2011; MALDONADO et al., 2011):

- Aumento da oferta de energia elétrica, que promove o desenvolvimento econômico e a melhoria na qualidade de vida da população local;
- Diminuição da necessidade de se obter energia a partir de usinas termelétricas à base de combustíveis fósseis, reduzindo custos e as emissões de poluentes na atmosfera;
- Oportunidade de se obter créditos de carbono, melhorando a imagem do município em relação ao desenvolvimento sustentável;
- Aumento da confiabilidade dos sistemas de fornecimento de energia elétrica;
- Diminuição dos custos referentes a sistemas de transmissão;
- Acesso à água potável e água para irrigações de plantações provenientes do reservatório;
- Alterações ao mercado de trabalho que se refere à geração de empregos durante a implantação e operação do empreendimento;
- Incentivo ao lazer, podendo o rio ser usado como balneário e para a pesca recreativa, incentivando o turismo na região;
- Alteração das arrecadações municipais, devido à contratação de trabalhadores e ao turismo, que aumenta o consumo de bens e serviços, potencializando a expansão do setor terciário;

- Incentivo à implantação na região de escolas profissionalizantes em áreas ligadas à geração de energia elétrica;
- Desenvolvimento de projetos sócio-educacionais nas PCH em parceria com instituições municipais, com o objetivo de tornar os cidadãos mais informados e conscientes quanto às questões energéticas no âmbito do desenvolvimento sustentável.

No Brasil, um caso de evidente sucesso referente à implantação de PCHs ocorreu no estado de Rondônia, que até 1987 tinha 100% de seu parque gerador formado por usinas termelétricas. Atualmente, esse percentual caiu para 65%, sendo que cerca de 8% da demanda de energia elétrica estadual é suprida pela geração proveniente das PCHs. Com a inserção das PCHs estima-se que 105.000 tCO₂/ano deixaram de ser emitidos na atmosfera e a economia no consumo de diesel passou a ser de 280.000 m³/ano, analisando os dados de 1988 a 2007. Além de reduzir o consumo de combustíveis fósseis no estado e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), as PCHs contribuíram para o fim do racionamento de energia, aumentaram a qualidade dos sistemas de distribuição, geraram economia aos cofres públicos, além de diversos empregos diretos e indiretos. Este é um caso de desenvolvimento econômico e social aliado à sustentabilidade (MALDONADO et al., 2011).

Em contrapartida, o estado do Mato Grosso tem sofrido as consequências negativas da implantação descontrolada de diversas PCHs na Bacia do Alto Paraguai, formadora do Pantanal, um dos maiores patrimônios ecológicos do Brasil. Os ambientalistas constataram que a operação em conjunto de 29 PCHs instaladas na bacia está impactando a biodiversidade local, visto que os pescadores observaram uma queda drástica na quantidade de peixes após a construção das barragens. Além disso, podem ocorrer alterações dos períodos de cheia e de seca, em função de se ter uma variação artificial do fluxo do rio.

De acordo com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA), na última década foi autorizada a construção de 154 hidrelétricas espalhadas pelas bacias dos rios Paraguai, Araguaia, Amazonas e Tocantins. Entretanto, a Assembléia Legislativa analisou somente 12 processos de abertura de PCHs neste período, sendo que todas as demais foram autorizadas de forma inconstitucional, sem que fosse feita uma análise detalhada sobre os impactos, tanto ao meio ambiente como às populações das regiões envolvidas. Tanto deputados como estudiosos defendem mudanças na legislação no caso da instalação de várias PCHs em um único rio ou bacia hidrográfica, para que sejam exigidos os relatórios e estudos de impactos ambientais do conjunto, pois a análise de uma PCH isoladamente não retrata a realidade e o meio ambiente pode vir a sofrer danos irreversíveis (MALDONADO et al., 2011).

A Constituição Federal de 1998 consagra o direito de todos os brasileiros ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, enfatizando o papel do cidadão na sua proteção e gestão. A participação dos cidadãos e das organizações da sociedade civil em defesa do meio ambiente ocorre através do processo de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e dos meios judiciais (Ação Civil Pública - ACP e Ação Popular - AP) que permitem a proteção do meio ambiente como de interesse difuso. A AIA inclui os procedimentos que vão desde os estudos de impacto até a audiência pública (DARZÉ, 2002).

Quanto aos recursos hídricos, a Lei n.º. 9.433 de 08 jan. 1997 estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) como complementar à Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), estabelecida pela Lei n.º. 6.938 de 31 ago. 1981, cujo objetivo principal é estabelecer a compatibilidade do desenvolvimento econômico social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico. Um dos objetivos da PNRH é assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequado aos respectivos usos e a utilização adequada e racional dos recursos hídricos visando o desenvolvimento sustentável (VEIGA, 2001).

Deste modo, a Constituição Brasileira prevê que para assegurar a efetividade do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado compete ao Poder Público exigir, na forma da lei, que seja realizado um rigoroso processo de licenciamento ambiental para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente como, por exemplo, a construção de uma usina hidrelétrica ou, com base no caso do Pantanal mato-grossense, a construção de várias pequenas centrais em uma mesma bacia hidrográfica (SOUSA, 2000).

Os estudos necessários para a obtenção do licenciamento ambiental referente à construção de uma hidrelétrica são (DARZÉ, 2002):

- Estudo de Inventário: Realiza-se o levantamento dos dados da bacia hidrográfica e carbonífera, para se determinar o potencial hidráulico do recurso hídrico e a sua forma de aproveitamento. Devem-se selecionar adequadamente as áreas de implantação mais favoráveis, levando em conta os impactos sobre as demais atividades associadas (áreas de inundação, áreas de preservação, reservas indígenas, mineração, transporte, etc.).
- Estudo de Viabilidade do Projeto: Nesta etapa devem ser elaborados o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto no Meio Ambiente (RIMA), de caráter obrigatório segundo a Resolução n.º. 001 de 23 jan. 1986 instituída pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). No EIA/RIMA devem constar todos os Programas Básicos Ambientais (PBAs) e as condicionantes que deverão ser implementadas para a

submissão ao órgão fiscalizador competente (IBAMA ou órgão estadual). É nesta etapa também que todos os agentes envolvidos (comunidades, organizações não governamentais - ONGs, governos, assembleias legislativas, etc.) têm participação direta no processo através das audiências públicas obrigatórias.

O financiamento de projetos por entidades governamentais brasileiras fica condicionado, com o Decreto 99.274/90, ao licenciamento ambiental. Isto pode ser observado via junção do preceito constitucional e dos preceitos da legislação ordinária (Leis 6.803/80 e 6.938/81) e, somente após a aprovação dos referidos estudos, o projeto poderá ir a leilão.

Para assinar a concessão, o investidor deve ter a Licença Prévia (LP) concedida pelo órgão fiscalizador com base nos EIA-RIMA. Para iniciar as obras, o concessionário precisa da Licença de Instalação (LI), a qual é expedida pelo órgão fiscalizador mediante a verificação da evolução adequada da implementação dos PBAs, iniciados na etapa denominada Projeto Básico (PB) do empreendimento. Após a conclusão das obras, o investidor parte para a Licença de Operação (LO) que permitirá o enchimento do reservatório e o início da operação da usina. Durante a operação, deverá ser avaliado o desempenho dos equipamentos antipoluentes e dos programas ambientais implantados. É importante destacar que, ainda que sejam cumpridas todas as exigências previstas no EIA-RIMA, o investidor ainda fica sujeito a ações judiciais (ACP e/ou AP) que venham a impedir ou postergar o recebimento de qualquer das licenças (VEIGA, 2001).

As licenças expedidas têm prazo de validade limitado. Uma vez expirado o prazo, será necessária a solicitação de uma prorrogação (nos casos da LP e LI) ou de uma renovação (no caso da LO) da licença junto ao órgão ambiental competente. O artigo 18º da Resolução 237/97 do CONAMA, que regulamenta para todo o território nacional os procedimentos para o Licenciamento Ambiental, define que o órgão ambiental competente estabelecerá os prazos de validade para cada tipo de licença.

Ficam evidentes os esforços das entidades governamentais em criar mecanismos que garantam o desenvolvimento sustentável. Entretanto, falta estruturar melhor os setores de modo a proporcionar mais clareza, agilidade e responsabilidade aos processos de licenciamento ambiental. O fato de se ter 828 dispositivos legais e administrativos que relacionam somente o meio ambiente ao setor elétrico, aliado ao grande número de processos de outorga de empreendimentos energéticos, indica que a complexidade e a burocracia são os principais responsáveis pelas falhas do sistema.

3 REPOTENCIAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Este capítulo apresenta o conceito de repotenciação de usinas hidrelétricas, uma análise detalhada dos seus aspectos técnicos, econômicos e sócio-ambientais, bem como as perspectivas para este empreendimento no Brasil.

3.1 Definição

Segundo Veiga (2001), a definição clássica para repotenciação é a de que corresponde a todas as obras que tem por objetivo gerar ganhos de potência e de rendimento na usina. A repotenciação pode se traduzir na adoção de avanços tecnológicos, de concepções mais modernas de projeto, utilização de folgas existentes no projeto original ou mediante instalação de unidades geradoras em usinas que foram dimensionadas com poços adicionais para futura motorização (BORTONI, 2011). São passíveis de repotenciação centrais com mais de 20 anos e cujos grupos geradores ultrapassaram mais de 120 mil horas de operação (BERMANN, 2008). A expectativa é de que as usinas repotenciadas elevem os padrões de produtividade total, com redução de custos operacionais, maior flexibilidade operativa e observando os aspectos ambientais (EPE, 2008).

A repotenciação de um aproveitamento hidrelétrico começa com o levantamento da capacidade de geração de energia. Através de simulação, em modelos computacionais, de usinas individualizadas, avalia-se a interação do aproveitamento que se deseja repotenciar com as demais usinas de sua cascata e de todo o sistema interligado, estudando várias alternativas de potência instalada. Os modelos utilizados no dimensionamento das usinas têm evoluído consideravelmente. As usinas mais antigas foram dimensionadas a partir de sistemas de avaliação da relação “Potência instalada/Energia gerada” que, muitas vezes, eram fruto apenas da experiência dos técnicos envolvidos. Somente a partir de 1962 surgiram os primeiros modelos computacionais para simular a operação de usinas hidrelétricas (CASTRO; BURANI, 2004).

Novos dados de vazão, acumulados durante mais de 20 anos de vida de uma usina, ao serem incorporados ao histórico de vazões naturais afluentes, podem levar à conclusão de que a usina foi subdimensionada à época de seu projeto. A evolução da tecnologia de medição e restituição de vazões afluentes também pode ser responsável por variações significativas encontradas em algumas usinas. A construção de um novo aproveitamento hidrelétrico a montante de outros na mesma bacia hidrográfica, pode implicar em alteração na potência

efetiva gerada pelas usinas de jusante da bacia, ensejando uma revisão seqüencial (EPE, 2008).

Após o levantamento da capacidade de geração, deve-se fazer uma análise técnica precisa e criteriosa, verificando a eficiência da geração de energia e o estado atual de seus componentes mais importantes, destacados na Figura 1, em relação à confiabilidade operacional que se espera da usina.

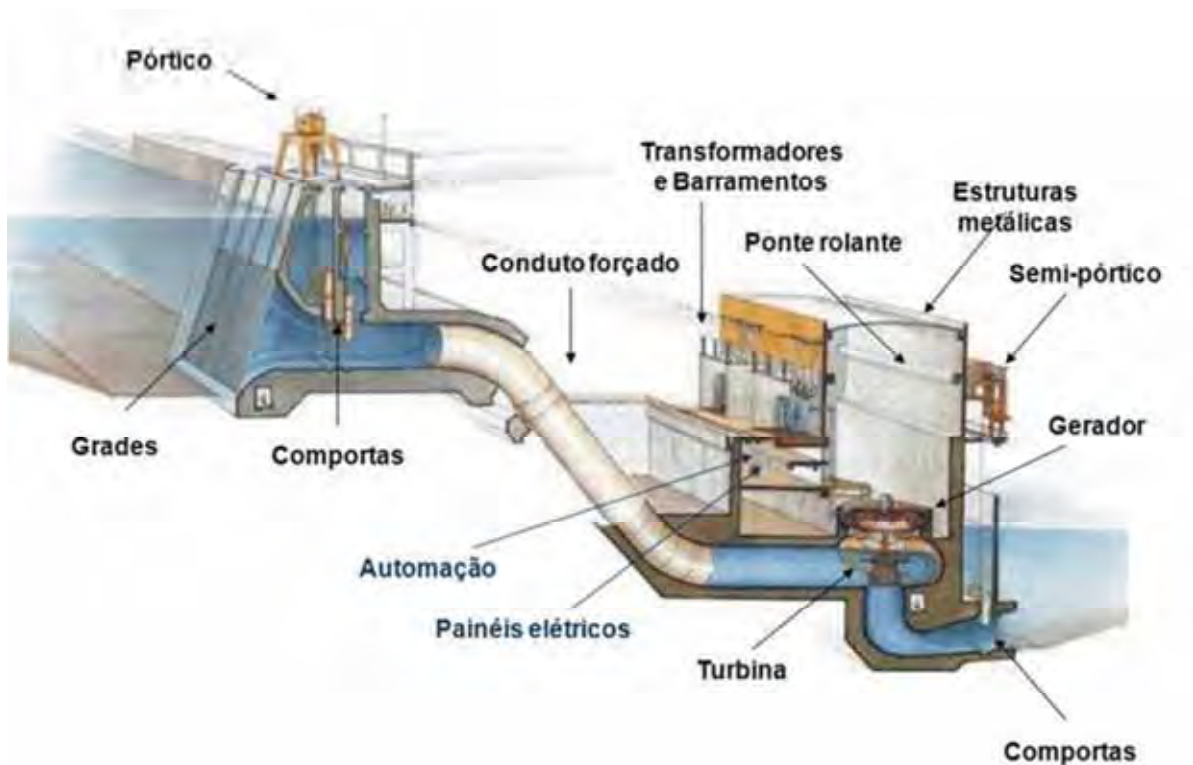


Figura 1 - Usina Hidrelétrica: Principais Componentes (Fonte: INEPAR⁴).

A ação natural do tempo provoca a deterioração dos equipamentos e a redução de sua capacidade nominal ao longo dos anos. A velocidade e o ritmo desta deterioração dependem do tipo de equipamento, dos materiais envolvidos, do regime de operação e das manutenções preventivas e corretivas realizadas ao longo de sua vida útil.

Também em razão da defasagem tecnológica, a eficiência dos antigos equipamentos instalados na usina pode ser bastante inferior à de novos equipamentos (turbina, gerador, sistemas de controle, etc.), caso eles não tenham sofrido modernizações ao longo de sua vida útil (EPE, 2008).

⁴ Disponível em: <http://www.inepar.com.br/not_uhe_santonio.htm>. Acesso em: 05 fev. 2012.

Esta análise possibilita otimizar a geração elétrica, prevenir paradas não programadas, introduzir oportunamente ações corretivas e estimar as condições dos equipamentos e quanto tempo ainda resta de vida útil dos mesmos (VEIGA, 2001).

As opções a serem consideradas após a avaliação do desempenho integrado de uma usina e de suas unidades separadamente são (VEIGA, 2001):

- Desativação;
- Reparo e prosseguimento operacional;
- Reconstrução;
- Reabilitação.

Sob uma perspectiva que leva em consideração apenas as características técnicas e econômicas, no caso de se detectar na avaliação baixa confiabilidade e baixo fator de capacidade que podem comprometer a disponibilidade futura da máquina, não justificando o investimento no empreendimento, opta-se pelo reparo ou, até mesmo, pela desativação da usina. Entretanto, essas alternativas podem não ser a melhor opção caso a prioridade dos aspectos sócio-ambientais justifiquem outra tomada de decisão.

A reconstrução implica na total substituição dos principais componentes e de estruturas importantes para a otimização do recurso, pode interferir no dimensionamento do reservatório, representando, praticamente, a construção de uma usina essencialmente nova, sendo mais aplicada em PCHs e em usinas termelétricas.

A reabilitação, mais comumente aplicada em grandes centrais hidrelétricas, consiste em uma manutenção mais aprimorada nos equipamentos e estruturas, visando aumentar a vida útil, melhorar o rendimento, incrementar a confiabilidade, reduzir paradas e simplificar a operação (VEIGA, 2001). A reconstrução e reabilitação de usinas é o momento oportuno para inserir novas tecnologias na operação, automatizando, modernizando e, até mesmo, tornando-as desassistidas através da digitalização e informatização dos sistemas de comando e controle. A modernização pode ser uma estratégia para garantir a extensão de vida útil de antigas usinas hidrelétricas (EPE, 2008).

A reavaliação da potência nominal de uma unidade repotenciada é motivo de apreciação para fins de regularização por parte da ANEEL, conforme estabelece a Resolução n° 407, de 19 de outubro de 2000 (EPE, 2008).

Conceitualmente, a energia produzida anualmente (EP) obedece à equação (2):

$$EP = t \times P \times FC \quad (2)$$

sendo:

$t =$ Número de horas por ano ($t = 8760$ horas, sem considerar indisponibilidade).

$P =$ Potência Instalada (total das potências nominais das unidades geradoras);

$FC =$ Fator de Capacidade (Relação “Potência gerada/Potência instalada” da usina);

Um dos objetivos da repotenciação é aumentar a quantidade de energia elétrica produzida e isto pode ser obtido pelo aumento da potência instalada ou do fator de capacidade, conforme análise da equação (2).

O fator de capacidade original das máquinas pode ser recuperado através de ações presentes na reconstrução e reabilitação. O reparo interfere no fator de capacidade apenas pela redução de paradas para manutenção corretiva da usina. Quando o fator de capacidade das máquinas apresenta uma diminuição significativa, a repotenciação torna-se uma necessidade (GYORI, 2007).

A potência instalada da usina é determinada a partir dos valores de referência da altura de queda líquida usada no projeto da turbina e a vazão nominal utilizada para se determinar a potência nominal dos geradores, sendo que estes podem variar significativamente com o tempo e com a operação da usina (MME, 2007). A reconstrução pode interferir diretamente na potência instalada quando, através de estudos hidrológicos precisos, verifica-se a possibilidade de aumentar a capacidade instalada da usina. A substituição, ou mesmo a instalação, de máquinas pode resultar em aumentos significativos na energia gerada, sem a necessidade de alterações na estrutura civil.

Naturalmente, a capacidade de produção de energia elétrica de uma usina estará sempre limitada pela potência efetiva total dos geradores. Além disso, em um instante qualquer, a potência total disponível para geração pode estar reduzida devido às indisponibilidades forçadas e programadas de unidades geradoras (EPE, 2008).

3.2 Análise técnica

A análise técnica da repotenciação é a etapa do processo que irá nortear todas as demais. Sabe-se que usinas construídas há mais de duas décadas necessitam de uma manutenção mais minuciosa e prolongada. A decisão sobre que tipo de repotenciação realizar envolve a avaliação preliminar dos seguintes parâmetros (BERMANN, 2008):

- **Avaliação Hidrológica:** consiste na análise dos dados antigos e novos da série histórica de vazões do rio que poderá concluir pela revisão do projeto hidrológico, motivado por alterações climáticas, maior série de dados coletados e, inclusive, melhores condições de monitoramento dos reservatórios. Neste estudo se reavalia vazão assegurada, queda de projeto, potência assegurada e energia assegurada. No caso de repotenciação de PCHs, novos estudos hidrológicos são essenciais, devido a prática de não se esgotar o potencial hidrelétrico disponível nas construções mais antigas e, no caso de usinas à fio d'água, isso é um fator decisivo na avaliação da real capacidade de geração de energia elétrica.
- **Avaliação do Circuito Hidráulico:** é o diagnóstico do estado das estruturas civis e mecânicas do circuito hidráulico da máquina, desde as grades na tomada d'água até o tubo de sucção, que podem provocar perdas de carga. Existe uma série de componentes no circuito hidráulico que se deterioram com o tempo e que devem ser recuperados como vigas, as próprias grades, a caixa espiral e septos tanto da tomada d'água como da sucção. A recuperação se constitui em eliminar incrustações, deformações e desgastes tanto das partes metálicas como de concreto, diminuindo a rugosidade das paredes e peças. A Figura 2 mostra uma tubulação adutora que sofreu um golpe de aríete⁵.



Figura 2 - Efeitos do Golpe de Aríete em um Conduto Forçado (Fonte: GYORI, 2007).

⁵ O golpe de aríete é o fenômeno transitório de elevação (golpe de aríete positivo) ou diminuição (golpe de aríete negativo) da pressão provocado pelo fechamento ou abertura rápida do mecanismo de controle (válvula, injetor, distribuidor, etc.) de vazão em um conduto forçado. Um caso de interesse é o fechamento do distribuidor que o regulador de velocidade executa quando ocorre uma rejeição parcial ou total de carga em uma central hidrelétrica para limitar a sobrevelocidade do gerador e da turbina (MARTINS, 2004).

- Avaliação do Gerador: consiste na análise da idade, das características e do estado de envelhecimento provocado pelos esforços térmicos, elétricos, ambientais e mecânicos (TEAM). Deve-se verificar no prontuário do gerador a existência de sobrecargas imprevistas como excesso de temperatura ou, deficiência de construção como desgaste da isolamento por efeito corona. Deve-se adotar um programa para a avaliação das condições dos seguintes componentes: enrolamento do estator, enrolamento de campo, ranhuras do enrolamento do estator, núcleo do estator, rotor, a fim de elevar o índice de confiabilidade. Em relação aos aspectos térmicos, a avaliação dos enrolamentos do estator e de campo pode indicar a necessidade de substituição dos mesmos, alterando sua seção condutora e classe de isolamento. É recomendada a modernização do sistema de excitação e o sistema de ventilação também deve ser readaptado. A Figura 3 mostra o grupo turbina-gerador de uma pequena central hidrelétrica (GYORI, 2007).



Figura 3 - Grupo Turbina-Gerador (Fonte: GYORI, 2007).

- Avaliação da Turbina: exige o estudo da sua documentação de projeto e de seu prontuário de manutenções, a inspeção visual detalhada do seu estado de conservação, ensaios de vibração do eixo e a execução de ensaios de rendimento operacional. O ensaio de rendimento da turbina vai determinar as possibilidades de restabelecimento de suas condições originais ou, até mesmo, a substituição de seu rotor. Este ensaio é conhecido como “*Index Test*” e utiliza a vazão medida na entrada da caixa espiral da turbina, a queda

líquida e o rendimento do gerador, para comparar a potência motora à potência produzida e, então, determinar o rendimento da turbina.

- Avaliação do Sistema de Transformação e Transmissão: o circuito elétrico em série na saída dos terminais do gerador precisa ser examinado em sua totalidade: disjuntor, barramento de fases isoladas ou cabos elétricos, transformador elevador e demais componentes. Deve ser feita a verificação da compatibilidade da capacidade da instalação com as novas condições de operação da usina, a confiabilidade de seus equipamentos e suas conexões. A Figura 4 ilustra uma subestação elevadora.



Figura 4 - Subestação Elevadora (Fonte: CERPCH⁶).

Cada avaliação mencionada pode demorar até quatro meses para ser concluída (BERMANN, 2011).

O Quadro 1 apresenta os ganhos possíveis de serem obtidos com a repotenciação de alguns dos parâmetros avaliados:

Quadro 1 - Percentuais de Ganhos Energéticos obtidos com a Repotenciação (Adaptado de: VEIGA, 2001).

REPOTENCIAÇÃO	PERCENTUAL DE GANHO
Hidrológica	10 a 15%
Circuito Hidráulico	Até 1%
Turbina	2 a 5%
Gerador	20 a 30%

⁶ Disponível em: < <http://www.cerpch.unifei.edu.br/subestacao-elevadora.html>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

Se a repotenciação resultar em modificações no rotor da turbina, devem ser examinados também, o circuito hidráulico da casa de força (constituído de tomada d'água, conduto forçado, caixa espiral e distribuidor da turbina, rotor da turbina, tubo de sucção e canal de fuga), o eixo da turbina (no que diz respeito ao acréscimo de torque) e o gerador (no que se refere ao torque e aquecimento). Um acréscimo de vazão requisitado pelo aumento de potência pode ocasionar uma sobrepressão maior no conduto forçado (VEIGA, 2001).

Componentes dispostos em série devem ser avaliados em conjunto quando um deles sofre uma intervenção, principalmente quando há elevação de potência. Equipamentos periféricos, como regulador de velocidade ou sistema de excitação do gerador, devem sofrer modificações específicas na repotenciação. Em relação aos reguladores, eles podem ser substituídos totalmente por reguladores digitais de última geração, ou mesmo passar por uma adaptação, substituindo algumas peças e acessórios por outros mais modernos, resultando num aumento da confiabilidade e eficiência do sistema.

Após a avaliação técnica dos equipamentos e da estrutura da usina deve ser possível determinar (VEIGA, 2001):

- Taxa de disponibilidade das unidades geradoras;
- Queda da eficiência operacional das unidades geradoras;
- Sistema de distribuição a ser beneficiado com a repotenciação: Interligado (SIN) ou Isolado (GD);
- Perspectivas de ganhos de potência e energia com a repotenciação, que podem ser resultados de intervenções na queda líquida, na vazão turbinada, na disponibilidade e no rendimento das unidades geradoras.

Os ganhos na queda líquida são possíveis por aumento do nível de montante, por diminuição no nível de jusante ou, ainda, por redução das perdas por atrito no circuito hidráulico. O aumento da vazão turbinada ocorre caso o projeto tenha sido subdimensionado originalmente ou caso tenha havido uma alteração hidrológica estrutural responsável por um aumento da vazão natural média no local da usina.

Quanto à disponibilidade, no parque gerador brasileiro não há margem para ganhos significativos, uma vez que os índices de indisponibilidade que vêm sendo utilizados nos estudos de planejamento da operação já são relativamente baixos.

Os ganhos de rendimento, em geral, surgem da introdução de tecnologias mais modernas nos equipamentos de conversão eletromecânica da usina hidrelétrica, principalmente turbinas e geradores. A alteração do rendimento de um conjunto turbina-gerador provoca ganhos de potência efetiva e produção de energia apenas na respectiva usina

hidrelétrica. Entretanto, podem ocorrer efeitos sinérgicos e cumulativos com relação às demais usinas, principalmente quando se trata da operação integrada de aproveitamentos hidrelétricos em cascata (EPE, 2008).

A reabilitação do grupo turbina-gerador deve ser estudada com detalhes depois de concluída a etapa de diagnósticos e estudos da usina. Vale lembrar que paradas para recapacitar turbinas ou geradores levam de seis a nove meses e nestas paradas é conveniente desenvolver em paralelo as outras reabilitações dos equipamentos.

As alternativas de repotenciação das unidades geradoras, bem como os ganhos de potência que podem ser obtidos com cada uma delas, são apresentadas no Quadro 2:

Quadro 2 - Alternativas de Repotenciação e Ganhos de Potência Estimados (Adaptado de: VEIGA, 2001).

REPOTENCIAÇÃO	TURBINA	GERADOR	GANHO DE POTÊNCIA	OPERAÇÃO
MÍNIMA	Reparo	Reparo	2,50%	BASE
LEVE	Reparo (Operação no limite)	Repotenciação (Classe de Isolação)	10%	BASE/PONTA
PESADA	Nova Condição de Operação Substituição da Rotor	Repotenciação Geral	20%	BASE/PONTA
			30%	

• Repotenciação Mínima:

A Repotenciação Mínima pode proporcionar ganhos de capacidade da ordem de 2,5%, correspondendo ao reparo da turbina e do gerador. Este reparo é a recuperação dos componentes desgastados, proporcionando a extensão da vida útil do equipamento. A causa mais comum de desgaste de um rotor é a erosão por cavitação, ocasionada pelo impacto contínuo das partículas líquidas sobre as pás, provocando solicitações dinâmicas que causam perda de material por fadiga. As crateras formadas prejudicam o desempenho da turbina em termos de rendimento e de resistência mecânica, além de poder desenvolver um processo de cavitação acelerado. A atividade de reparo aplicada nesse caso é a reposição do material perdido na erosão feita por soldagem a arco elétrico (FILIPPIN; LIRA, 2001). A Figura 5 apresenta erosões provocadas pela cavitação no rotor de uma turbina Francis.

A turbina e o gerador também podem ser recuperados através da substituição de todos os elementos ou materiais que estiverem apresentando desgastes e que se tornaram obsoletos. Isto pode implicar em modificações nos eixos e mancais de guia das turbinas, nos enrolamentos de campo e do estator do gerador, no rotor, nos sistemas de ventilação, nas vedações, nas lubrificações, na isolação dos componentes do gerador e na instrumentação.



Figura 5 – Rotor de uma Turbina Francis com Cavitações (Fonte: METALINE⁷).

A Repotenciação Mínima prevê a continuidade da operação das unidades geradoras sob as mesmas condições originais, normalmente como o projeto elaborado na fase de construção da usina, fornecendo energia de base (BERMANN, 2011).

• Repotenciação Leve:

A Repotenciação Leve, que prevê cerca de 10% de ganho de capacidade, consiste em acumular água para operação na ponta ou, se houver condições hidrológicas, na base, operando na capacidade limite de projeto da turbina. Isto exige que seja realizado o reparo da turbina e a verificação da resistência mecânica de componentes (BERMANN, 2011).

O próprio processo de soldagem a arco elétrico para repor na turbina o material perdido na erosão por cavitação insere tensões residuais na região denominada Zona Termicamente Afetada (ZTA). O nível de tensão residual é função do tipo de material de base, do processo de soldagem empregado, da velocidade de resfriamento, da geometria e condições de apoio da estrutura. As tensões residuais reinantes em cada porção de material se somam às tensões de operacionais, podendo levar esta região da estrutura à falha mesmo com as cargas dentro do limite de projeto (FILIPPIN; LIRA, 2001).

As medidas que minimizam as trincas nas pás dos rotores das turbinas são: otimização da faixa de operação, emprego de materiais mais resistentes à cavitação nas recuperações dos

⁷ Disponível em: <http://www.metaline.eu/wPortugiesisch/einsatzgebiete/energie_kommunaltechnik/K19.php?navanchor=2110052>. Acesso em: 05 fev. 2012.

rotores, o emprego de processos de soldagem a arco elétrico com menor aporte de calor e o alívio das tensões residuais. O método mais eficiente para aliviar as tensões residuais seria o tratamento térmico localizado, que consiste em aquecer a região a ser aliviada até uma temperatura definida em função das composições do material de base do rotor e do material de adição a ser empregado na soldagem de reparo, por um período de tempo suficiente, para que ocorra uma acomodação desta região sob uma nova condição de equilíbrio isento de tensões, ou pelo menos com menor intensidade (FILIPPIN; LIRA, 2001).

A Repotenciação Leve exige também que o gerador melhore suas condições de isolamento, devido ao seu maior aquecimento na operação. Os enrolamentos dos geradores antigos, construídos com isolamento classe B (que suporta até 120 °C), possuem vida útil de 25 anos. Desta forma, a repotenciação pode implicar na substituição do enrolamento do estator, conforme ilustrado na Figura 6, mudando não só a sua secção condutora, como também a classe de temperatura de B para F que suporta temperatura de 155 °C. Essa mudança permite instalar, na mesma ranhura existente no núcleo do estator, barras com secção maior de cobre e uma secção menor de isolamento com o mesmo poder dielétrico (VEIGA, 2001).



Figura 6 - Substituição do Enrolamento de um Gerador (Fonte: UOL⁸).

⁸ Disponível em: <<http://olhares.uol.com.br/turbina-hidreletrica-foto2865205.html>>. Acesso em: 07 mar. 2012.

O enrolamento de campo do gerador, quase sempre suporta um acréscimo de potência da ordem de 20%, sem necessidade de ser substituído. Recomenda-se a modernização do equipamento de excitação por serem constituídos de máquinas rotativas.

Com o aumento da potência gerada, aumenta-se o calor dissipado pelos componentes do gerador, sendo necessário verificar se o sistema de ventilação está de acordo com as modificações realizadas com o processo de repotenciação. O projeto de ventilação deverá sofrer modificações como: inserir ventiladores maiores (sistemas de ventilação do tipo aberto), aumentar o fluxo de água (sistemas de resfriamento à água) ou resfriar a água dos radiadores (sistemas de ventilação do tipo circuito fechado com radiadores).

- Repotenciação Pesada:

A Repotenciação Pesada que, segundo a classificação da ANEEL prevê ganhos de 20% a 30% na capacidade instalada, é possível quando estudos hidrológicos indicam novas curvas de permanência dos reservatórios e, portanto, novos valores de energia assegurada. Sendo assim, torna-se necessária a substituição do rotor da turbina para que ela opere sob novas condições de projeto, como pode ser observado na Figura 7.

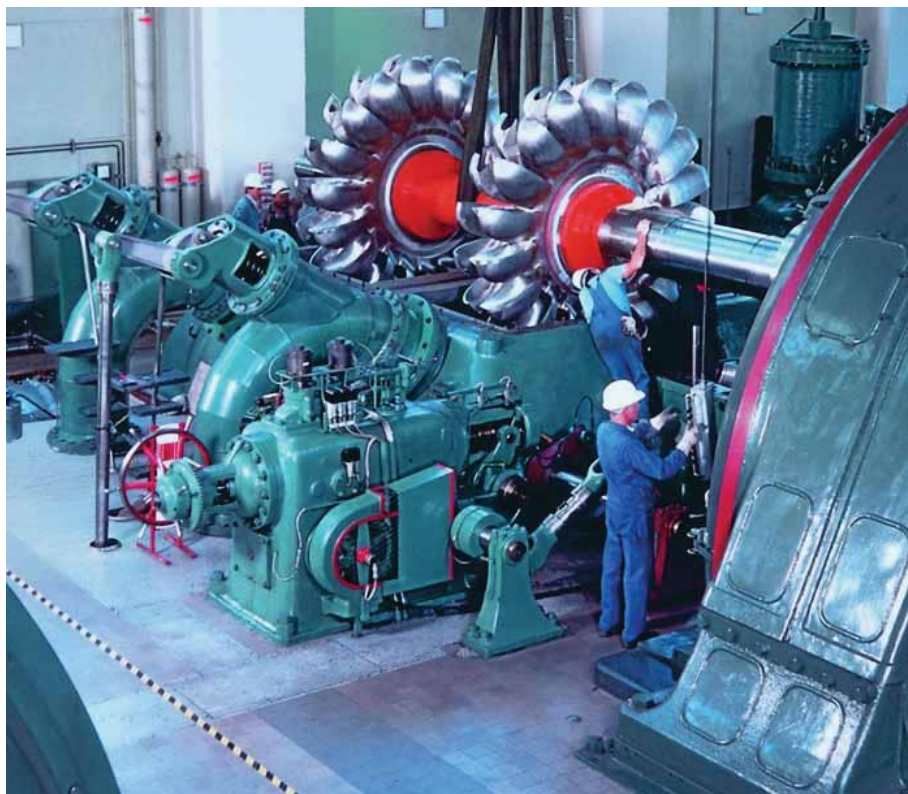


Figura 7 - Instalação de um Novo Rotor Pelton (Fonte: ALTERIMA⁹).

⁹ Disponível em: <<http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=24>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

Na repotenciação pesada, o gerador deverá sofrer repotenciação completa, pela troca de classe de isolamento, substituição de enrolamento, chapas de núcleo e, possivelmente, até a substituição do rotor. No caso de ser verificado um valor de capacidade de geração muito superior ao instalado, pode ser viável a troca completa do grupo turbina-gerador (VEIGA, 2001).

Uma estimativa rigorosa dos ganhos proporcionados pelas obras de repotenciação das usinas hidrelétricas do SIN requer um levantamento criterioso dos dados básicos de cada usina, uma análise rigorosa de cada projeto, uma simulação detalhada da operação do sistema para se calcular os ganhos de potência efetiva e energia assegurada, do sistema e de cada usina. Não raro, a realização de certos estudos de suporte do planejamento, como é a avaliação do potencial de repotenciação, é prejudicada pela falta de dados confiáveis e abrangentes sobre empreendimentos. Como não se faz o estudo, não se consegue demonstrar com segurança qual seria o benefício potencial do projeto. Sem a demonstração do benefício, não se consegue obter os recursos necessários para se fazer o levantamento dos dados básicos ou para o detalhamento do projeto (EPE, 2008).

3.3 Análise econômica

A tomada de decisão sobre a viabilidade de projetos de repotenciação de usinas hidrelétricas envolve aspectos técnicos, econômicos e sócio-ambientais. Os resultados econômicos são, na maioria dos casos, a principal variável que determina a viabilidade de um projeto de repotenciação, já que, diferente da construção de uma nova usina, não encontra barreiras na legislação ambiental que vem sendo o principal obstáculo para a liberação de muitos empreendimentos energéticos. A confiabilidade dos resultados obtidos na análise econômica depende do grau de precisão obtido nas avaliações técnicas preliminares (GYORI, 2007).

No estudo de viabilidade econômica de um projeto de repotenciação devem ser considerados somente os custos que proporcionam ganhos de energia gerada, ou seja, qualquer outro custo da usina que não esteja associado à repotenciação, deve ser tratado separadamente para não inviabilizar o projeto em questão. A viabilidade econômica de uma obra de repotenciação é verificada quando o custo de energia produzida atinge valores menores que os de referência de comercialização, incluindo os créditos de carbono (BERMANN et al., 2004).

Nos projetos de repotenciação, é necessário que o custo da obra e o ganho de produção de energia sejam muito bem detalhados para determinar a sua atratividade. Para tanto, basta retirar o custo dos capitais não amortizados anteriormente, os custos de outras partes da obra que não são de repotenciação e os custos administrativos da usina que continuam os mesmos (eventualmente até menores), para se obter o Valor Presente (VP) anualizado dos custos (VEIGA, 2001).

Se na avaliação hidrológica for verificada a possibilidade de aumentar a capacidade instalada da usina e, deste modo, optar-se pela reconstrução, devem ser acrescentados os custos das novas estruturas civis, dos novos equipamentos eletromecânicos e dos impactos sócio-ambientais (licenças e programas de mitigação).

O orçamento de um estudo de repotenciação é a etapa principal para que a análise econômica do empreendimento seja precisa. O custo de projeto gira em torno de 7% do custo total da obra de repotenciação (MME, 2007). Os custos com as obras civis devem ser levantados com exatidão a partir de estudos do projeto proposto, dependendo do tipo de repotenciação a ser implementada.

Os custos de equipamentos e serviços devem ser obtidos por pesquisas em empresas da área, por composição de preços considerando as características do local do empreendimento quanto a fornecimento de materiais e mão-de-obra, consulta a órgãos públicos ou a tabelas de preços unitários publicadas. Devem ser acrescentados os seguintes encargos sobre o custo total da aquisição de materiais: 15% de impostos, 5% de transporte e seguro e 10% referente à montagem e teste dos equipamentos (ELETROBRAS, 2007b).

Dependendo do tipo de repotenciação a ser realizada em uma usina hidrelétrica, torna-se necessário parar as máquinas. Se a intervenção for feita no período seco¹⁰ e houver a possibilidade de realizar a repotenciação em etapas, indisponibilizando uma máquina de cada vez, a geração de energia pode não ser prejudicada. Caso haja a interrupção no fornecimento de energia em virtude das obras de repotenciação, os custos de indisponibilidade devem ser levados em consideração na análise econômica do projeto. Entretanto, os custos de indisponibilidade das máquinas devido às paradas para manutenções corretivas e contingências do sistema devem ser traduzidos em receita na análise de viabilidade econômica, visto que a repotenciação diminui a ocorrência de falhas nas máquinas (GYORI, 2007).

¹⁰ Período Seco: corresponde aos meses de maio a novembro, período de baixo índice pluviométrico. Nessa época as afluições aos reservatórios começam a diminuir e os armazenamentos dos reservatórios se tornam muito importantes. Disponível em: <<http://www.lightempresas.com.br/web/atendimento/tarifas/teperiodos.asp?mid=868794297228722672287229>>. Acesso em: 17 mar. 2012.

No caso da repotenciação de usinas hidrelétricas desativadas, o custo de indisponibilidade não deve ser considerado na análise econômica, já que a usina não estava produzindo energia antes de ser repotenciada. Entretanto, devem ser incorporados no estudo de viabilidade econômica os custos administrativos e operacionais da usina, bem como os custos referentes aos tributos e encargos, licenciamentos e às perdas nas linhas de transmissão. Neste contexto, as PCHs apresentam vantagens intrínsecas quando comparadas às usinas de grande porte, pois se localizam próximas ao centro consumidor, aumentando a oferta de energia e a confiabilidade do sistema elétrico com significativa redução dos custos e perdas nas linhas de transmissão.

Os investimentos necessários para implementar obras de repotenciação estão situados entre 200,00 e 1.400,00 R\$/kW instalado. Um tempo de amortização de cinco anos é considerado pelos investidores um indicador de viabilidade econômica deste tipo de empreendimento (BERMANN et al., 2004).

As receitas que devem ser contabilizadas na análise econômica são aquelas obtidas mediante as oportunidades de negócios do mercado de energia, específicas para casos de repotenciação de usinas hidrelétricas. Os empreendedores de geração de energia elétrica estão submetidos a oportunidades que podem ser classificadas como mercadológicas e operacionais.

As mercadológicas dependem de decisões estratégicas, do quanto de sua energia disponível deve ser contratada ou ser mantida livre. A energia livre pode ser negociada no mercado SPOT¹¹ ou através de contratos bilaterais com outros agentes que, por algum motivo, estejam gerando menos energia do que a contratada (VEIGA, 2001).

As operacionais permitem uma melhor análise de viabilidade econômica de uma obra de repotenciação, sendo elas:

- Energia Livre: Elevar a capacidade de geração com a repotenciação para obter, em curto prazo, blocos de energia para comercialização no mercado SPOT.
- Reserva de Potência: Conforme norma do Operador Nacional do Sistema (ONS), todo agente de geração deve manter 5% de sua capacidade geradora como reserva. A repotenciação pode ser uma opção para se obter a capacidade reserva.
- Energia de Base: Quando a avaliação hidrológica da usina indicar vazões asseguradas suficientes para aumentar a potência gerada na base, o investimento na repotenciação terá sua maior atratividade.

¹¹ O termo mercado SPOT (*Spot Market*), ou mercado à vista, é um termo genérico usado para designar mercados onde se negocia ativos para entrega imediata, em contraste com os mercados onde se negocia ativos para entrega futura, designados por mercado a prazo.

- Energia de Ponta: Se os estudos hidrológicos não justificarem investimentos em repotenciação para a operação da usina na base, deve-se avaliar a operação da usina somente na ponta. O baixo investimento e o preço da energia na ponta podem tornar interessante o projeto de repotenciação.
- CT-Energ: A repotenciação se enquadra nos projetos de eficiência energética, beneficiados pelo Fundo Setorial de Energia (CT-Energ). O financiamento originado de empresas concessionárias de energia elétrica, num percentual variável de 0,75% a 1% da receita operacional líquida, pode reduzir do tempo de retorno do capital investido na repotenciação.
- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): A repotenciação de usinas hidrelétricas coloca energia limpa e renovável no sistema elétrico, enquanto uma usina termelétrica, por exemplo, gera energia através da queima de combustíveis fósseis que emite gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera. Deste modo, considera-se que o ganho de energia obtido com a repotenciação pode substituir a energia que seria gerada por uma usina termelétrica, contribuindo para o atraso de seu acionamento ou, até mesmo, para a sua desativação. Sendo assim, a emissão de gases de efeito estufa que estaria sendo evitada é convertida em créditos de carbono que, se comercializados, contribuem para a viabilização econômica de projetos de repotenciação.

Os créditos de carbono podem representar de 3% a 5% do faturamento anual do empreendimento, principalmente no caso de repotenciação de usinas desativadas, onde toda a energia gerada é convertida em CO₂e¹², enquanto para usinas em operação a conversão é feita apenas sobre o ganho de energia obtido (MACHADO; PEDROSO, 2011). No mercado atual, a tonelada de CO₂e está sendo comercializada por, aproximadamente, € 8¹³.

Para se determinar a quantidade de emissões de CO₂e que são evitadas em um projeto de repotenciação e que podem gerar lucros para os investidores, utiliza-se o cálculo da linha de base. Para projetos de repotenciação de PCHs, enquadrados em projetos de pequena escala deve-se aplicar a metodologia aprovada AMS-I.D – “Geração de eletricidade renovável conectada à rede” e para projeto de grande escala, a metodologia ACM0002 – “Metodologia de linha de base consolidada para geração de eletricidade a partir de fontes renováveis conectada à rede” (MACHADO; PEDROSO, 2011).

¹² O CO₂ equivalente (CO₂e) é a representação padrão de crédito de carbono, sendo que todos os outros gases de efeito estufa são convertidos para unidades de massa de dióxido de carbono (CO₂).

¹³ 1 euro (€) equivale a 2,40 reais, cotação de março de 2012.

A linha de base vem a ser o ganho de MWh produzido pela unidade de geração renovável multiplicado por um fator de emissão (FE) (medido em tCO₂e/MWh) calculado como sendo a média ponderada da margem de operação aproximada (FE_{MO}) e da margem de construção (FE_{MC}):

$$FE = 0,5 \times FE_{MO} + 0,5 \times FE_{MC} \quad (3)$$

Sendo que:

- A margem de operação aproximada (FE_{MO}) é a média ponderada das emissões (em tCO₂e/MWh) de todas as fontes de geração que atendem ao sistema, não incluindo as usinas com baixo custo operacional e operação obrigatória;
- A margem de construção (FE_{MC}) é a média ponderada das emissões (em tCO₂e/MWh) de recentes adições de capacidade ao sistema. Essas adições são definidas como as maiores (em MWh) das 20% mais recentes das centrais existentes ou como as cinco centrais mais recentes (MCTI/ACM0002, 2006).

No Brasil, o cálculo do fator de emissão é realizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), com dados disponibilizados pelo ONS, sendo o mais recente, referente a 2010, de 0,3095 tCO₂e/MWh (MCTI, 2012).

Após determinada a linha de base, basta multiplicar o valor encontrado pelo preço de venda da tonelada do carbono equivalente, para se obter a receita que o empreendimento de repotenciação deverá receber pela implementação do projeto no âmbito do MDL (GYORI, 2007).

Para se chegar aos valores referentes à comercialização da energia, deve-se comparar a energia produzida antes e depois da repotenciação. No caso de usinas em operação, desconta-se da nova energia aquela parcela que já vinha sendo produzida anteriormente. Somente a receita obtida com o ganho de energia deverá ser incluída na análise econômica do empreendimento. Para usinas desativadas, a receita obtida com a comercialização de toda a energia produzida deve ser considerada na análise econômica.

A redução dos custos de indisponibilidade devido a manutenções corretivas obtida com as obras de repotenciação também pode ser incorporada na análise de viabilidade econômica do empreendimento, caso haja dados suficientes para garantir precisão nos resultados.

3.4 Análise sócio-ambiental

3.4.1 Impactos sócio-ambientais

Os impactos ambientais decorrentes da construção de empreendimentos energéticos têm inviabilizado muitos projetos, mais até do que os aspectos técnico-econômicos. A outorga de projetos de construção de novas usinas depende da criação e implementação de programas ambientais com o objetivo de prevenir, compensar ou mitigar os principais impactos negativos previstos. Ao contrário da construção, a repotenciação e reativação das usinas já existentes, elevam a oferta de energia elétrica do sistema, com impactos negativos menores ou mesmo inexistentes (MALDONADO et al., 2006).

Considerando a idade avançada das usinas a serem repotenciadas, a maioria dos impactos provocados no período da construção já foi absorvida pela natureza no decorrer dos anos, de modo que a fauna e a flora já estão readaptadas ao ambiente da usina, a emissão dos gases de efeito estufa pelo reservatório é considerada nula e não existe a necessidade de deslocamento compulsório da população.

A repotenciação do tipo reabilitação não interfere no nível do reservatório, afastando as hipóteses de novos processos erosivos à margem do lago, de novas decomposições orgânicas que afetam a qualidade da água e de inundações de terras cultiváveis, sítios históricos, matas nativas, etc. Este tipo de repotenciação é o mais praticado em usinas de grande porte, por não causar nenhum impacto ambiental, já que qualquer alteração no reservatório de uma grande usina implicaria em graves impactos, custos elevados e maior burocracia referente aos licenciamentos, que poderiam inviabilizar a obra.

Projetos de repotenciação que resultam na reativação de usinas sem interferir no nível do reservatório, também representam uma opção ambientalmente viável, além de gerar expectativas, aumentar as arrecadações municipais, gerar novos empregos à comunidade, incentivar o turismo, a pesca recreativa, afetando positivamente a economia local.

Nas usinas podem ser desenvolvidos projetos educacionais para a população em parceria com instituições municipais, abordando temas como: piscicultura, agricultura, preservação ambiental, preservação das espécies em extinção, uso racional de energia elétrica, uso racional da água, entre outros. Projetos educacionais voltados para a conscientização sobre a importância da preservação e do uso racional dos recursos disponíveis são fundamentais para se diminuir a necessidade da expansão dos sistemas, economizando nos custos das obras, custos operacionais, minimizando os impactos ambientais e socioculturais, e

melhorando a qualidade de vida da população. Uma usina hidrelétrica em operação pode incentivar o governo a investir em educação profissionalizante no município, ou mesmo na região, em que a mesma está instalada, a fim de formar mão-de-obra qualificada para atender à demanda de trabalho que o empreendimento possa promover (GYORI, 2007).

A repotenciação do tipo reconstrução, mais praticada em PCHs, apesar de ocasionar, na maioria das vezes, ganhos significativos de energia, pode causar impactos negativos de maior amplitude, o que implicaria na necessidade da elaboração de um Relatório Ambiental Simplificado (RAS) e, possivelmente, um novo EIA para que a usina adquira um novo licenciamento de operação (VEIGA, 2001).

No Brasil, não existe na Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) orientação específica para obras de repotenciação de usinas. Devem ser seguidas as diretrizes da regulamentação em vigor para novos empreendimentos. Todo acréscimo de geração deve ser registrado e autorizado pela ANEEL (GYORI, 2007).

Há muito já se sabe que a energia elétrica promove o progresso e melhora a qualidade de vida daqueles que têm a oportunidade de usufruir deste bem. Pelo fato da matriz elétrica brasileira ter o predomínio da geração hidrelétrica, a repotenciação proporciona garantia física aos empreendimentos, aumentando a vida útil dos mesmos, a confiabilidade do sistema, além de promover ganhos de energia que podem beneficiar o SIN ou sistemas isolados, quando se tratar de geração distribuída.

3.4.2 O mercado de crédito de carbono

O cenário mundial tem voltado sua atenção para as questões ambientais que têm representado uma ameaça ao futuro do planeta. O relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) em 2001 concluiu que a temperatura média da superfície subiu de 0,4 a 0,8 °C a partir de 1860, que o nível dos oceanos subiu de dez a vinte centímetros no século XX, que a precipitação de chuvas em muitas regiões continua aumentando, a cobertura de neve e gelo sobre os continentes continua decrescendo, e que está havendo mudanças nos padrões de circulação da atmosfera bem como aumento do número de eventos climáticos extremos. O principal responsável por esse desequilíbrio ambiental é o efeito estufa, processo pelo qual a presença de gases atmosféricos faz com que a temperatura da terra aumente a níveis acima do normal (INATOMI; UDAETA, 2005).

No intuito de garantir a sustentabilidade do planeta, o Tratado de Quioto, negociado pela Comissão das Nações Unidas para a Mudança do Clima (CNUMC) e assinado em 1997,

criou para os países desenvolvidos a obrigação de reduzir as emissões de gases de efeito (GEE) estufa em 5,2% em relação às emissões registradas em 1990, no período de 2008 a 2012.

Durante a 17ª Conferência da Organização das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 17), realizada em dezembro de 2011 em Durban, na África do Sul, ficou estabelecido que o segundo período de compromissos do Tratado de Quioto começa em 2012 e deve ir até 2017, podendo chegar a 2020. O mesmo incluirá novos cortes de redução de GEE, mas só os europeus estão comprometidos com o prolongamento de Quioto; a Rússia, o Canadá e a Austrália, que estavam na primeira fase, não irão fazer novos cortes nesse novo período. Por sua vez, os Estados Unidos e todas as economias emergentes, ou seja, os maiores poluidores do mundo estão incluídos nesta nova fase. Os diplomatas reunidos em Durban comemoraram o feito como um "momento histórico", visto que é a primeira vez que todos os países do mundo estarão em um mesmo acordo, tentando cortar suas emissões. O quanto cada um irá cortar, no entanto, deverá ser diferente para países industrializados e o mundo em desenvolvimento. Durante a conferência, a Alemanha, a Dinamarca e a Noruega se comprometeram com recursos para o fundo climático global, que deve ajudar os países pobres a se adaptarem ao aquecimento global (JMA, 2011).

Os resultados da COP 17, embora positivos, ainda não colocam o planeta em uma rota segura. A ciência diz que os cortes nas emissões têm que ser fortes o suficiente para que a temperatura da Terra não aumente mais de 2 °C até o fim do século. As estimativas dos pesquisadores são de que há o risco ainda da temperatura aumentar entre 3 °C a 4 °C, o que amplia consideravelmente o espectro e a intensidade de secas, enchentes e outras catástrofes climáticas (JMA, 2011).

Para que os países possam atender as metas de redução de emissões, foram criados três mecanismos de flexibilização: o Comércio de Emissões, a Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), sendo este último o mais importante para o Brasil, pois é o único que permite a participação dos países em desenvolvimento.

O MDL permite que os países desenvolvidos possam investir em projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa nos países em desenvolvimento, gerando créditos de carbonos (Reduções Certificadas de Emissões – RCEs). As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) que ocorreriam na ausência de projetos como os do MDL, considerando as tecnologias disponíveis e as condições econômicas prevalentes, são definidos como linha de base (REIS, 2002).

No caso dos países desenvolvidos, o interesse em investir em projetos MDL se deve ao fato de o custo marginal de abatimento das emissões nos países em desenvolvimento serem menores que em seus próprios territórios.

Os projetos do MDL devem resultar em benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo em relação à redução de GEE e devem ser adicionais, ou seja, deve ser assegurado que a redução de emissões não ocorreria na ausência de tal projeto (SANTOS, 2005).

As etapas para aprovar um projeto de créditos de carbono junto à ONU são (MACHADO; PEDROSO, 2011):

- Desenvolvimento do Documento de Concepção do Projeto (DCP);
- Validação do DCP (auditoria autorizada);
- Aprovação do DCP junto ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI);
- Registro do DCP junto à ONU.

A elaboração do DCP é a primeira etapa do ciclo. Esse documento deverá incluir, entre outras coisas, a descrição: das atividades de projeto; dos participantes da atividade de projeto; da metodologia da linha de base; das metodologias para cálculo da redução de emissões de gases de efeito estufa e para o estabelecimento dos limites da atividade de projeto e das fugas; e do plano de monitoramento. Deve conter, ainda, a definição do período de obtenção de créditos, a justificativa para adicionalidade da atividade de projeto, o relatório de impactos ambientais, os comentários dos atores e informações quanto à utilização de fontes adicionais de financiamento. Os responsáveis por essa etapa do processo são os participantes do projeto.

A validação é o segundo passo e corresponde ao processo de avaliação independente de uma atividade de projeto por uma Entidade Operacional Designada (EOD), no tocante aos requisitos do MDL, com base no DCP.

A aprovação, por sua vez, é o processo pelo qual a Autoridade Nacional Designada (AND) das partes envolvidas confirma a participação voluntária e a AND do país onde são implementadas as atividades de projeto do MDL atesta que tal atividade contribui para o desenvolvimento sustentável do país. No caso do Brasil, os projetos são analisados pelos integrantes da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC), que avaliam o relatório de validação e a contribuição da atividade de projeto para o desenvolvimento sustentável do país, segundo cinco critérios básicos: distribuição de renda, sustentabilidade ambiental local, desenvolvimento das condições de trabalho e geração líquida de emprego, capacitação e desenvolvimento tecnológico, e integração regional e articulação com outros setores.

Registro é aceitação formal, pelo Conselho Executivo, de um projeto validado como atividade de projeto do MDL. A aprovação de projetos no Conselho Executivo do MDL é subsequente à aprovação pela AND. A aprovação pela CIMGC é necessária para a continuidade dos projetos, mas não é suficiente para sua aprovação pelo Conselho Executivo, que analisa também a metodologia escolhida, a adicionalidade do projeto, entre outros aspectos. O registro é o pré-requisito para o monitoramento, a verificação/certificação e emissão das RCEs relativas à atividade de projeto no âmbito do MDL (MCTI, 2007).

O processo de monitoramento da atividade de projeto inclui o recolhimento e armazenamento de todos os dados necessários para calcular a redução das emissões de gases de efeito estufa, de acordo com a metodologia de linha de base estabelecida no DCP, que tenham ocorrido dentro dos limites da atividade de projeto e dentro do período de obtenção de créditos. Os participantes do projeto serão os responsáveis pelo processo de monitoramento.

A verificação é o processo de auditoria periódico e independente para revisar os cálculos acerca da redução de emissões de gases de efeito estufa ou de remoção de CO₂, resultantes de uma atividade de projeto o MDL que foram enviados ao Conselho Executivo por meio do DCP. Esse processo é feito com o intuito de verificar a redução de emissões que efetivamente ocorreu. Após a verificação, o Conselho Executivo certifica que uma determinada atividade de projeto atingiu um determinado nível de redução de emissões de gases de efeito estufa durante um período de tempo específico.

A partir do momento em que o Conselho Executivo tem certeza de que, cumpridas todas as etapas, as reduções de emissões de GEEs decorrentes das atividades de projeto são reais, mensuráveis e de longo prazo, as RCEs podem ser geradas. As RCEs são emitidas pelo Conselho Executivo e creditadas aos participantes de uma atividade de projeto na proporção por eles definida e, dependendo do caso, podendo ser utilizadas como forma de cumprimento parcial das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GYORI, 2007).

Os créditos de carbono podem ser solicitados por um período único de 10 anos ou por um período de 7 anos, com possibilidade de renovação por mais dois períodos consecutivos de 7 anos cada, totalizando até 21 anos de obtenção de créditos de carbono (MACHADO; PEDROSO, 2011).

O cálculo dos créditos de carbono deve seguir uma metodologia previamente aprovada pela ONU, de acordo com a escala em que o projeto se enquadra: empreendimentos com potência instalada igual ou inferior a 15 MW são considerados de pequena escala e empreendimentos com potência instalada superior a 15 MW são considerados de grande escala. Teoricamente, projetos de pequena escala são submetidos a processos mais

simplificados e rápidos para obtenção do registro junto à ONU, como é o caso da repotenciação de muitas PCHs. As condicionantes mais importantes para o registro de um projeto de repotenciação são: o atendimento aos critérios de aplicabilidade, a comunicação correta à ONU sobre as atividades do projeto e a adicionalidade.

A condição inicial para que a repotenciação de uma PCH seja elegível como um projeto de créditos de carbono é que a relação entre a potência instalada e a área do reservatório da usina seja superior a 4 MW/km². Para usinas cuja razão entre a potência instalada e a área do reservatório fique entre 4 e 10 MW/km², ou seja, usinas com reservatórios considerados grandes, deve ser efetuado um desconto de 9% da quantidade de créditos gerados, a fim de contabilizar as emissões de GEEs devido à decomposição de matéria orgânica presentes nos sedimentos retidos no reservatório. Para empreendimentos cuja relação seja superior a 10 MW/km² não é realizado nenhum desconto (MACHADO; PEDROSO, 2011).

Para a ONU é importante que o projeto de créditos de carbono tenha estabelecido a data exata de início das obras. Esta data ocorre quando o proponente do projeto realiza um investimento financeiramente significativo em relação ao investimento total. No caso de repotenciação de PCHs, essa data pode ser, por exemplo, a data de contratação da empreiteira da obra ou a data de aquisição dos equipamentos eletromecânicos a serem substituídos, ambos os eventos envolvem investimentos significativos. De posse dessa informação, a ONU estabelece um prazo máximo de seis meses para o proponente do projeto entregue uma comunicação por escrito contendo informações do projeto, sob pena de, transcrevendo esse prazo, tornar o projeto inelegível.

Quanto à adicionalidade, os projetos, além de atenderem às questões anteriores, ou seja, possuírem no mínimo a relação 4 MW/km² e realizarem a comunicação à ONU e à CIMGC, devem comprovar obrigatoriamente, a partir de critérios específicos, que os créditos de carbono constituem um incentivo importante para a efetiva repotenciação da PCH. Esta é a condicionante que representa o maior número de rejeições de projetos pela ONU, devido a falta de clareza nos critérios apresentados (MACHADO; PEDROSO, 2011).

Uma vez que o projeto é elegível considerando as diretrizes da ONU, é oportuno avaliar quais as oportunidades existentes no mercado de créditos de carbono. Para o desenvolvimento do projeto e o pagamento da validação (auditoria) e outras taxas é possível financiar os custos através de linhas de crédito específicas disponibilizadas por bancos privados e públicos. Como o custo para o desenvolvimento e acompanhamento do projeto junto aos órgãos competentes é único para o DCP, é possível reunir mais de um empreendimento em um mesmo processo de registro, ou seja, desenvolver um único DCP para a repotenciação de

várias PCHs, a fim de minimizar os custos de investimento. O importante nessa situação é que os cronogramas de execução das obras de repotenciação das PCHs sejam semelhantes.

Mesmo que o projeto ainda não esteja registrado na ONU, é possível obter a receita dos recursos financeiros dos créditos de carbono através da venda antecipada dos mesmos e utilizá-los para auxiliar na execução das obras. Os projetos de créditos de carbono também poderão ser utilizados para integralizar garantias para obtenção de financiamento em bancos nacionais para realizar as obras de repotenciação.

Para países como o Brasil, as receitas provenientes da comercialização dos créditos de carbono trariam benefícios adicionais pelo fato de serem geradas em moeda forte (dólar norte-americano ou euro), protegendo a dívida contra a desvalorização da moeda nacional (real). Além da possibilidade de ganhar dinheiro com a negociação dos títulos de créditos de carbono, as empresas promotoras de projetos de repotenciação podem contar em seu balanço com um carimbo de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU) e melhorar sua imagem perante este mercado emergente (MALDONADO et al., 2006).

A participação de empresas brasileiras do setor de energia no mercado de créditos de carbono vem aumentando consideravelmente, com a participação de projetos de fontes renováveis, de repotenciação e de reflorestamento em andamento nas diversas instâncias de análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo abrindo possibilidades para o ingresso do setor nesse mercado emergente.

As empresas do grupo CPFL Energia tem se destacado no desenvolvimento de projetos MDL de repotenciação de PCHs. Em 2008, foram comercializados 37.583 RCEs referentes ao período de 2003 a 2007, com faturamento bruto de 507 mil euros. A estimativa de redução de emissões nesses empreendimentos equivale a 120 mil toneladas de gases causadores do efeito estufa, entre 2003 e 2012.

As usinas do Complexo Ceran foram alvo do primeiro negócio no mundo envolvendo a venda de RCEs de uma usina hidrelétrica a fio d'água. Com o negócio, foi concluída a venda de 254 mil RCEs relativos à geração hidrelétrica da UHE Monte Claro no período de 2005 a 2007, com faturamento bruto de 3,7 milhões de euros (CPFL, 2012).

As oportunidades dos empreendimentos energéticos junto ao mercado de carbono devem ser aproveitadas, pois além de proporcionarem benefícios econômicos que podem ser decisivos para viabilização dos projetos, ainda agregam valores sócio-ambientais importantes para caracterizar a atividade como contribuinte para o desenvolvimento sustentável.

3.5 Perspectivas para a repotenciação no Brasil

Nos estudos do PNE 2030 [...], as hipóteses estabelecidas sobre a viabilidade do potencial hidrelétrico brasileiro a longo prazo sustentam a perspectiva de se ter instalado, até 2030, uma potência hidrelétrica de 174 mil MW. Apesar de ter procurado balizar as restrições decorrentes dos impactos ambientais provocados pelo aproveitamento desse potencial, o estudo reconhece que, de fato, “são grandes as incertezas que envolvem o aproveitamento do potencial hidrelétrico brasileiro dentro de uma perspectiva de longo prazo, principalmente com relação ao potencial localizado na região amazônica” (EPE, 2008).

Nesse contexto, a repotenciação de usinas hidrelétricas existentes é apontada como uma alternativa promissora para a expansão da oferta de energia hidrelétrica no Brasil, com vantagens ambientais e de localização, e com atratividade econômica (EPE, 2008).

Recentemente, no Brasil, dois importantes trabalhos foram publicados sobre o tema (ANEEL; 2011):

- O primeiro, coordenado pela WWF-Brasil, uma organização não governamental focada na preservação do meio ambiente, estimou para o parque hidrelétrico brasileiro o potencial de repotenciação de até 8.093,19 MW, conforme apresentado na Figura 8. Esse valor considera o universo de 67 usinas com porte superior a 30 MW e com mais de 20 anos de operação, que totalizam 34.735 MW de capacidade instalada. Para esse universo o ganho de capacidade foi estimado em 23,3%, apenas com a substituição do rotor do gerador elétrico (BERMANN, 2011).

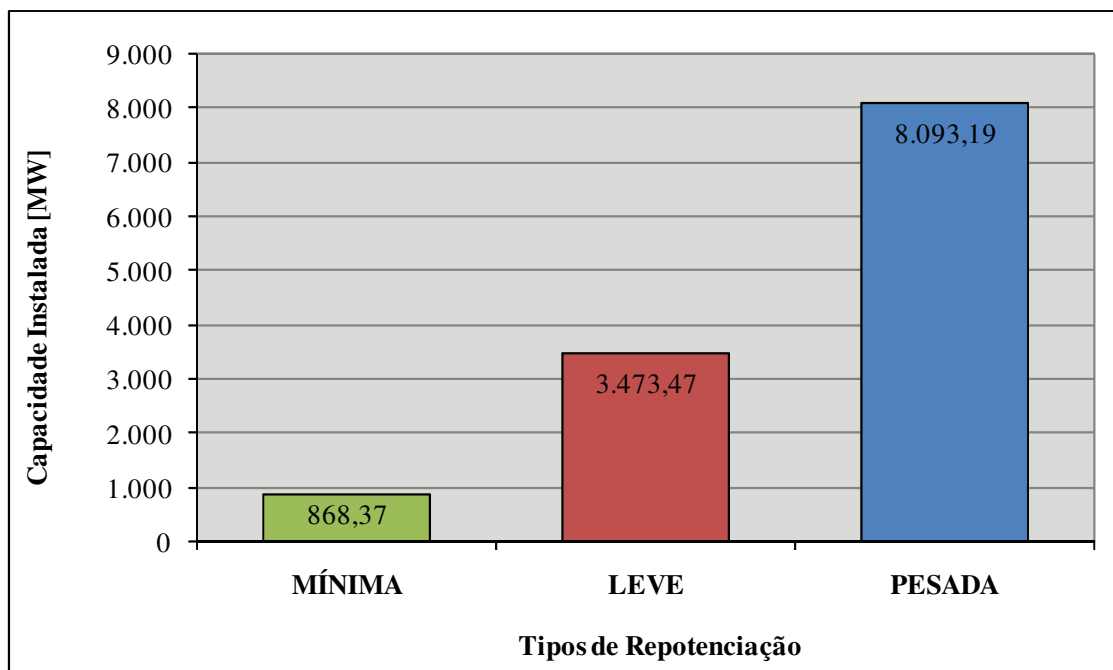


Figura 8 - Perspectivas de Ganhos com a Repotenciação de UHs no Brasil (Fonte: BERMANN, 2011).

- O segundo, conduzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), analisou o potencial de repotenciação com foco na segurança energética proporcionada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com a implementação de projetos no conjunto de usinas escolhido pela WWF-Brasil. O resultado do estudo da EPE mostrou que os ganhos adicionais de energia firme são da ordem de 270 MW, o que pode ser considerado como uma boa estimativa para o acréscimo da garantia física que seria percebida pelo SIN com a implementação desses projetos. O pequeno aumento de energia assegurada pode ser explicado pelo fato da geração ser simulada para um cenário hidrológico crítico, ou seja, com baixas vazões afluentes às hidrelétricas. Em regimes hidrológicos críticos, o benefício energético de incrementos de potência instalada em usinas é marginalizado, pois há insuficiência de recurso hídrico a ser convertido em energia elétrica. O acréscimo de potência efetiva que seria agregado ao sistema interligado, caso esses empreendimentos alcançassem um aumento máximo de rendimento a partir da repotenciação, seria de aproximadamente 605 MW (EPE, 2008).

Tanto o estudo da WWF-Brasil e da EPE se limitaram a avaliar os benefícios, ganhos de rendimento, dos projetos de repotenciação de unidades geradoras existentes em usinas de grande porte, não se atendo ao potencial dos projetos de instalação de novas unidades geradoras em poços existentes. Estima-se que a potência disponível para motorização de poços existentes no SIN seja de 5.214 MW, considerando a produtibilidade de cada usina ($\text{MW}/\text{m}^3/\text{s}$) a 65% do volume útil. Trata-se, portanto, de valores conservadores de vertimento, uma vez que para usina estar vertendo o volume útil, o nível do reservatório deve estar próximo do armazenamento máximo (ANEEL, 2011).

Muito embora a instalação de novas unidades geradoras nos poços existentes ou o aumento do rendimento das unidades em operação possam não trazer significativo incremento de energia firme, o que se observa, em muitas usinas, é que a potência adicional teria condições de ser utilizada nos períodos de afluência média e alta, isto é, fora do período crítico em que a energia firme é calculada, podendo trazer ganhos econômicos e de confiabilidade na operação do SIN.

Segundo previsões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), nos próximos anos a expansão da geração está calcada em, aproximadamente, 12 GW de UHEs com baixa ou nenhuma regularização, que faz com que a demanda de ponta seja atendida por térmicas, conforme apresentado na Figura 9 (ONS, 2011):

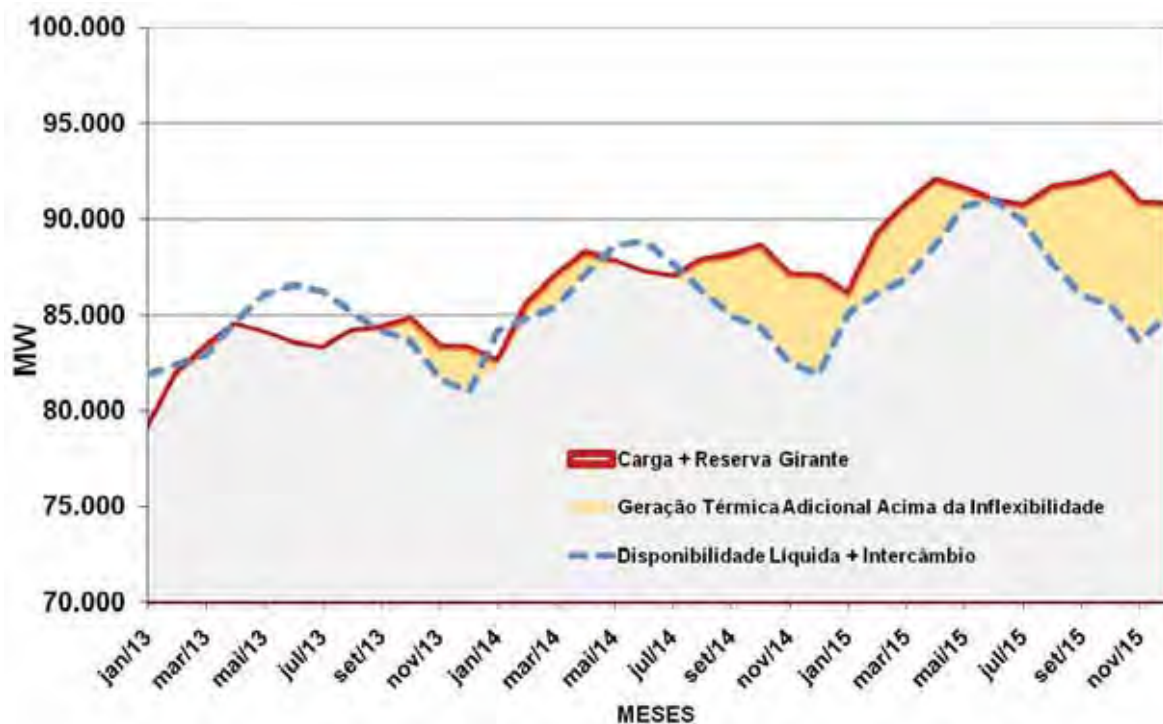


Figura 9 - Balanço de Ponta (Sem Repotenciação) – 2013/15 (Fonte: ONS, 2011).

Se fosse realizada a repotenciação através da motorização dos poços existentes no SIN, haveria uma redução significativa da participação de termelétricas na geração de energia de ponta, como pode ser observado na Figura 10:



Figura 10 - Balanço de Ponta (Com Repotenciação) – 2013/15 (Fonte: ONS, 2011).

Nos países industrializados, onde o aproveitamento hidrelétrico se fez há muitos anos, a repotenciação e modernização de antigas usinas hidrelétricas se tornaram uma atividade rotineira de gerenciamento de ativos, visando principalmente à recuperação e manutenção da produção das instalações. Nesses países, considera-se que o principal benefício da modernização de uma usina está na extensão de sua vida útil e na recuperação de sua confiabilidade, mesmo que não haja possibilidade de uma repotenciação e mesmo que não se obtenha nenhum ganho energético adicional.

No Brasil, os ganhos de energia assegurada obtidos com repotenciação geralmente são marginais, pois o rendimento da conversão de energia nas usinas hidrelétricas existentes, salvo raras exceções, já é bastante elevado. Entretanto, como pode ser observado nos estudos apresentados pelo ONS, é importante que os projetos de repotenciação sejam analisados e considerados também no âmbito dos estudos de planejamento energético de longo prazo, pois podem contribuir significativamente para aumentar a confiabilidade do sistema e reduzir custos referentes a geração termelétrica. O que se percebe é que existem vários entraves institucionais, legais e regulatórios que deprimem ou até mesmo impedem investimentos em projetos de repotenciação de usinas hidrelétricas. Nos últimos anos, diversos agentes do setor elétrico brasileiro têm manifestado sua preocupação com esses aspectos, que muitas vezes podem ser tão ou mais importantes que os aspectos técnico-econômicos quando se trata de viabilizar o empreendimento (EPE, 2008).

A principal fonte de receita da usina hidrelétrica provém da venda, seja por meio de contratos de médio/longo prazo ou no mercado de curto prazo, da garantia física associada à usina, sendo que um adicional pode ser obtido pela venda da energia secundária do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE), quando existente. A garantia física é atribuída a cada usina hidrelétrica por meio da contribuição que essa fornece a garantia de suprimento¹⁴ do SIN, de forma proporcional à energia firme¹⁵ de cada uma. Assim, como as vazões são reduzidas nessa circunstância, por mais que se incremente a potência da usina hidrelétrica, chegará um momento que tal incremento não será economicamente viável, uma vez que o custo para adicionar mais potência à usina é maior que o benefício da garantia física alcançada por ela (ANEEL, 2011).

¹⁴ A garantia de suprimento do SIN é definida como aquela correspondente à máxima quantidade de energia que este sistema pode suprir dado critério de igualar o Custo Marginal de Operação (CMO) ao Custo Marginal de Expansão (CME).

¹⁵ Energia firme ou energia assegurada de uma usina hidrelétrica corresponde à geração média nos meses do período crítico, isto é, de vazões reduzidas.

Na atual legislação, não existe um reconhecimento financeiro e comercial dos possíveis ganhos energéticos que venham a ser obtidos com um eventual aumento de potência efetiva sem aumento de rendimento da usina. O modelo de comercialização em vigor contempla, no mercado regulado, apenas contratos de energia assegurada (Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado - CCEARs). Como uma repotenciação sem aumento de rendimento não altera o valor da energia assegurada da usina, não é possível negociar um eventual acréscimo da energia efetivamente gerada em certos períodos (energia secundária), mesmo em se tratando de usina despachada pelo ONS. No caso, a energia adicional produzida na usina fica a disposição do sistema, gratuitamente (EPE, 2008). Porém, mesmo nos casos de repotenciação com aumento de rendimento, há dificuldades a serem superadas na medida em que a revisão da energia assegurada da usina e a homologação desta alteração junto ao Ministério de Minas e Energia (MME) e ANEEL não são imediatas, o que pode prejudicar sua comercialização (ANEEL, 2011).

Para agravar ainda mais o quadro, se o empreendedor não tem incentivo em sua receita por meio do aumento de garantia física para efetuar a repotenciação, duas novas despesas, que estão vinculadas à potência instalada, incidirão sobre ele caso a efetue: aumento no Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) e aumento da Taxa de Fiscalização dos Serviços de Energia Elétrica (TFSEE) (ANEEL, 2011). Conseqüentemente, a repotenciação pode ser vista, muitas vezes, como uma penalização (em vez de um incentivo) para o empreendedor. Certamente, esses problemas merecem tratamento regulatório, visto que representam um grande fator de desestímulo para que os agentes realizem por conta própria os investimentos necessários para aumentar a potência disponível de suas usinas hidrelétricas. O único benefício regulatório para os projetos de repotenciação é a possibilidade de expurgo do período de indisponibilidade associado ao período de modernização da unidade geradora (EPE, 2008)

Segundo a Associação Brasileira das Grandes Empresas Geradoras de Energia Elétrica (ABRAGE), toda vez que um agente gerador fosse modernizar as máquinas de sua usina, o ONS poderia solicitar um estudo sobre a sua repotenciação e, se aprovada a sua execução, o agente seria recompensado pela potência adicional disponibilizada para o SIN. Em caso de aumento de rendimento da usina, a energia assegurada seria revisada e a energia adicional poderia ser comercializada por meio de leilões exclusivos (EPE, 2008).

Como é possível observar, não existe uma regulamentação específica capaz de reconhecer completamente os ganhos energéticos advindos das obras de repotenciação de

modo a ressarcir os agentes de geração. Entretanto, alguns incentivos podem contribuir para a viabilidade econômica deste empreendimento.

A repotenciação se enquadra nos projetos beneficiados pelo Fundo Setorial de Energia (CT-Energ). Esse fundo é destinado a financiar programas e projetos na área de energia, com especial ênfase na área de eficiência energética no uso final, como comentado anteriormente. A proposta em questão procura aprimorar o mecanismo de incentivo à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) adotado pela ANEEL nos contratos de concessão, ampliando sua abrangência setorial. O financiamento origina-se de empresas concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, num percentual variável de 0,75% a 1% da receita operacional líquida. Uma parcela desses recursos será repassada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e administrada pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) (Lei nº. 9.991, de 24 jul. 2000) (GYORI, 2007).

Projetos de repotenciação de grandes e pequenas hidrelétricas podem obter financiamento a partir do BNDES e do FINEL. O BNDES financia até 40% de todo o investimento em repotenciação, incluindo bens e serviços. O Fundo de Financiamento da Eletrobrás (FINEL) financia até 80% do investimento em repotenciação de unidades geradoras e de transmissão existentes e eventuais aumentos da capacidade de transmissão/transformação para o escoamento do incremento de potências a ser disponibilizado. Além desses, deve-se destacar as oportunidades existentes através do mercado de carbono, como já mencionado anteriormente.

Um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética concluiu que, apesar de serem fundamentais para assegurar a longo prazo a preservação do potencial hidrelétrico já aproveitado, as ações de repotenciação e modernização de usinas hidrelétricas existentes somente não garantem a expansão necessária para suprir a demanda por energia elétrica no Brasil nos próximos anos. Nesse estudo são citados como benefícios da repotenciação: a extensão da vida útil das usinas, o aumento da sua confiabilidade, a segurança no controle e no fornecimento de ponta e a redução dos custos de manutenção, além de um eventual aumento da energia assegurada e da potência efetiva do parque gerador brasileiro.

Entretanto, verifica-se que tanto este estudo da EPE, quanto os outros já realizados sobre a repotenciação de hidrelétricas no Brasil, não se aprofundaram no potencial existente para as PCHs. A justificativa dada em muitos casos é a de que, pela pouca energia que agrega ao sistema (algo em torno de 3,3% da capacidade total instalada), o potencial a ser obtido com a repotenciação seria muito pequeno, podendo até não compensar o investimento. O fato é que existe um número considerável de PCHs que se encontram desativadas no Brasil, cerca de

600 usinas, que se repotenciadas, certamente, resultaria em um ganho de energia significativo se comparado ao que está sendo gerado pelas 423 PCHs atualmente em operação (ANEEL, 2012). A análise de viabilidade sobre projetos de repotenciação de PCHs deve ir além dos ganhos energético, contemplando o fato de que essas centrais já possuem toda a estrutura física construída, encontram-se próximas aos centros consumidores, demandam investimentos menores, causam baixo impacto sócio-ambiental, além de promoverem o desenvolvimento sócio-econômico na localidade em que estão inseridas.

No momento em que o mundo volta sua atenção para as questões de sustentabilidade, as tomadas de decisão para garantir o atendimento à demanda de energia futura devem ampliar os horizontes, não se atendo apenas aos aspectos técnico-econômicos, mas agregando valor aos meios que promovem melhorias na qualidade de vida da população e que venham a contribuir para a preservação do meio ambiente. Mesmo que a repotenciação não seja suficiente para, sozinha, suprir a demanda futura, por que não realizá-la ao mesmo tempo em que se constroem novos empreendimentos? Uma ação não exclui a outra, o que falta são providências institucionais para tornar os projetos de repotenciação mais viáveis.

4 MÉTODO DE AUXÍLIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

Este capítulo apresenta os métodos de auxílio à decisão multicritério, destacando o Processo Analítico Hierárquico (AHP), e como a teoria de conjuntos *fuzzy* pode ser aliada a estes métodos para tratar de variáveis lingüísticas em processos de tomada de decisão.

4.1 Definição

Segundo Saaty¹⁶ (2001 apud SALOMON, 2004, p. 1), a vida é um somatório de decisões, sendo que, freqüentemente, como se decide é tão importante quanto o que se decide. Decidir muito rápido pode ser desastroso e demorar muito pode significar perda de oportunidades. Entretanto, a necessidade de se tomar decisões é constante e uma abordagem sistemática e compreensiva pode auxiliar este processo.

A preocupação em estudar a forma como os seres humanos tomam decisões existe desde a época de Sócrates e Platão, quando já se acreditava que o método de tomada de decisão poderia ser melhorado por meio da melhora dos procedimentos mentais que levavam a ela (FERNANDES, 2009).

A tomada de decisão deve buscar o melhor resultado, a melhor avaliação, ou ainda, o melhor acordo entre as expectativas do “decisor” e as suas disponibilidades em adotá-la, considerando a relação entre elementos objetivos e subjetivos, visto que este processo é uma atividade humana fundamentada na noção de valor. Uma representação esquemática do processo de decisão é apresentada na Figura 11 (BOAS, 2006):

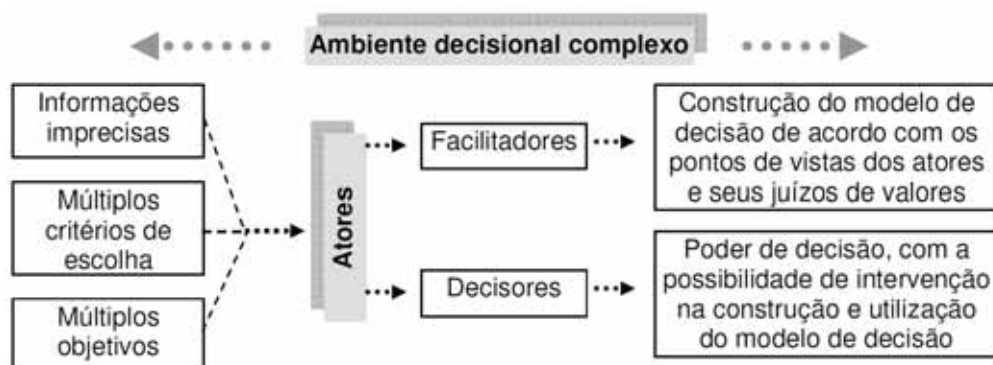


Figura 11 - Sistema de Tomada de Decisão (Fonte: BOAS, 2006).

¹⁶ SAATY, T. L. **Decision Making with Dependence and Feedback: the Analytic Network Process**. 2nd edition, Pittsburgh (USA): RWS, 2001 apud SALOMON, V. A. P. **Desempenho da modelagem do auxílio à decisão por múltiplos critérios na análise do planejamento e controle da produção**. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Observa-se que os atores¹⁷ são identificados como “facilitadores” e “decisores”. O papel do facilitador é esclarecer o processo de avaliação e/ou negociação inerente à tomada de decisão e construir um modelo que considere os pontos de vista dos atores e seus juízos de valores. Já os decisores são aqueles a quem foi moralmente ou formalmente delegado o poder de decisão, podendo intervir na construção e na utilização do modelo como ferramenta de avaliação. Pode-se dizer que o decisor é aquele que assume a culpa se a decisão gera um resultado desastroso (BOAS, 2006).

Deste modo, a tomada de decisão é definida como um esforço para resolver um dilema de objetivos conflitantes que acabam por impedir a existência de uma “solução ótima”, conduzindo à procura da “solução de melhor acordo”. Portanto, a complexidade da tomada de decisão requer um tratamento qualificado e justifica a utilização de métodos de apoio à decisão.

Os métodos que auxiliam os processos de tomada de decisão estão divididos em três grupos principais, como ilustrado na Figura 12: métodos de tomada de decisão com objetivo único (*Single Objective Decision Making – SODM*), sistemas de suporte à decisão (*Decision Support Systems – DSS*) e métodos de tomada de decisão por múltiplos critérios (*Multiple Criteria Decision Making – MCDM*) (ZHOU et al., 2006).

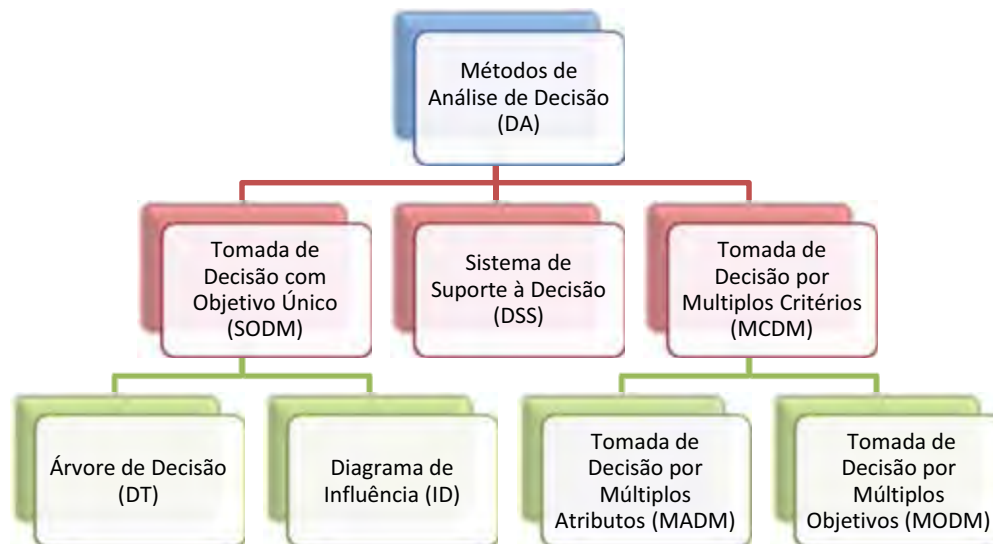


Figura 12 - Classificação dos Métodos de Análise de Decisão (Adaptado de: ZHOU et al., 2006).

Os métodos SODM avaliam as alternativas disponíveis com resultados incertos sob uma situação de único objetivo. A abordagem clássica é a árvore de decisão (*Decision Tree – DT*).

¹⁷ Atores são pessoas que têm interesses comuns nos resultados das decisões e influenciam na decisão através de seus valores individuais, sendo que cada um ocupa uma posição no contexto decisional.

Outra abordagem, o diagrama de influência (*Influence Diagram - ID*), fornece uma representação mais simples e compacta de problemas de decisão.

Os sistemas DSS referem-se a qualquer sistema de *software* interativo, flexível e adaptável, que integra os modelos, bases de dados e outros instrumentos de apoio a decisão, de uma forma que possa ser disponibilizada aos tomadores de decisão. Um DSS auxilia a solução de problemas de decisão complexos e não estruturados. Em DSS tradicionais, os usuários dependem do seu conhecimento como especialistas, a fim de escolher os parâmetros e modelos mais adequados. Recentes avanços em inteligência artificial levaram ao desenvolvimento de DSS inteligentes que proporcionam mais flexibilidade para os usuários em lidar com diferentes situações, incorporando uma base de conhecimento que contém o conhecimento heurístico de especialistas (ZHOU et al., 2006).

Os métodos MCDM permitem que os tomadores de decisão escolham ou classifiquem alternativas com base em uma avaliação de acordo com múltiplos critérios. As decisões são tomadas com base em *trade-offs*¹⁸ ou compromissos entre uma série de critérios que estão em conflito uns com os outros. Tomada de decisão com múltiplos objetivos (*Multiple Objective Decision Making - MODM*) e tomada de decisão por múltiplos atributos (*Multiple Attribute Decision Making - MADM*), também conhecida como análise de decisão multicritério (*Multiple Criteria Decision Analysis - MCDA*), são os dois principais ramos do MCDM. Os métodos MODM são modelos de programação matemática multiobjetivos, em que um conjunto de objetivos conflitantes é otimizado e sujeito a um conjunto de restrições matematicamente definidos. O objetivo consiste em escolher a melhor entre todas as alternativas. Um caso especial de MODM é a programação linear por múltiplos objetivos (*Multiple Objective Linear Programming - MOLP*), onde as funções objetivo e as restrições são funções lineares. O presente trabalho tem como foco principal os métodos MCDA, que se referem a tomadas de decisões de preferência através da avaliação e priorização de todas as alternativas que são geralmente caracterizadas por múltiplos critérios conflitantes (ZHOU et al., 2006).

Os métodos multicritério estruturados surgiram durante a Segunda Guerra Mundial, a partir da necessidade da estruturação matemática dos problemas logísticos enfrentados na guerra que, até aquele momento, eram resolvidos de forma ineficiente por meio da expectância matemática, dado o risco associado a esta metodologia. Os MCDAs que existem atualmente derivam dos esforços realizados nas décadas de 60 e 70, com os trabalhos

¹⁸ O *trade-off* representa um conflito de escolha, é uma decisão onde se necessita abrir mão de algo em função de outro. De forma simples, pode-se dizer que quando um requisito melhora o outro piora.

pioneiros de, respectivamente, Bernard Roy na França, com o método ELECTRE (que se tornaria uma família de métodos com o mesmo nome), Thomas Saaty, nos Estados Unidos, que desenvolveu o método AHP (*Analytic Hierarchy Process* – Processo Analítico Hierárquico), e Keeney e Raiffa com a teoria da utilidade multiatributo (*Multi-Attribute Utility Analysis* – MAUT), também nos Estados Unidos (CARLSSON; FULLÉR, 1996).

Com a expansão das pesquisas nesta área evidenciou-se a criação de três linhas dentro do assunto MCDA (CARLSSON; FULLÉR, 1996):

- Métodos de subordinação de síntese (*outranking*): os métodos de subordinação, também denominados métodos de subclassificação, fundamentam-se na construção de uma relação de subclassificação que incorpora as preferências estabelecidas pelo especialista diante dos problemas e das alternativas disponíveis. A abordagem da subordinação de síntese é expressa pelo axioma de comparabilidade parcial, segundo o qual três situações fundamentais de preferência podem ser encontradas: incomparabilidade (R), preferência forte (P) e indiferença (I), e ainda, em algumas circunstâncias admite-se a preferência fraca (Q), que leva em conta casos de indecisão entre P e I. Nestes métodos consideram-se como dominadas as alternativas que são piores que as demais em um maior número de critérios. Têm-se como métodos de subordinação: QUALIFLEX, ORESTE, MELCHIOR, PROMETHEE, TACTIC, N-TOMIC, ELECCALC, ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III e ELECTRE IV.
- Métodos de julgamentos interativos: esse método faz referência aos MODMs, onde o processo de modelação das preferências consiste numa seqüência de interações entre os atores do processo de decisão, alternadas com fases de cálculo, sendo um dos principais tipos abordados o MOLP. No entanto, muitos métodos interativos apresentam o inconveniente de convergirem para uma solução que independente do decisor. Os principais métodos interativos são: o método Stem, os métodos de Geoffrion (1972), de Zionts e Wallenius (1976), de Steur (1986) e o de Vincke (1976).
- Métodos de agregação a um critério único de síntese (Teoria da Utilidade): estes métodos assumem que as preferências dos especialistas podem ser representadas por uma função única de utilidade ou de valor. Estas devem ser avaliadas pelo analista com o uso de modelos aditivos, multiplicativos, entre outros. Os métodos de agregação são: o método UTA, PREFCALC, UTASTAR, MINORA, AHP e o MACBETH (*Measuring Attractiveness by Categorical Based Technique*) (LARRUBIA, 2010).

Devido à grande variedade de métodos de MCDA, acadêmicos europeus, como o francês Prof. Bernard Roy e o belga Prof. Philippe Vincke, propuseram uma divisão do

conjunto de métodos de MCDM em duas escolas de abordagens (ROY; VANDERPOOTEN, 1996):

- Escola Européia, com métodos de subordinação e síntese.
- Escola Norte-Americana, com métodos baseados na função utilidade.

O método de decisão multicritério é adequado para resolução de problemas complexos que apresentam alto grau de incerteza, objetivos conflitantes, diferentes tipos de dados e informações, múltiplos interesses e perspectivas e a quantificação complexa de parâmetros qualitativos de sistemas biofísicos e sócio-econômicos. A principal vantagem do MCDA é que este envolve múltiplos atributos para obter um resultado integrado de tomada de decisão. Por estes motivos, o MCDA tem sido muito aplicado a problemas de planejamento energético, principalmente após a década de 1980, quando as questões ambientais se tornaram um importante critério a ser considerado nos processos de decisão sobre a viabilidade desses empreendimentos (WANG et al., 2009).

A Figura 13 apresenta a disposição geral do agrupamento da matriz de decisão de um MCDA envolvendo m alternativas avaliadas sob n critérios:

$$\begin{array}{c}
 \text{Critério } C_1 \quad C_2 \quad \cdots \quad C_n \\
 (\text{Pesos } w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n) \\
 \text{Alternativas} \text{ ---} \\
 X = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_3 \end{array} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}
 \end{array}$$

Figura 13 - Disposição da Matriz de Decisão de um MCDA (Adaptado de: WANG et al., 2009).

Sendo x_{ij} o dado numérico referente ao critério j da alternativa i , w_j é o peso do critério j , n é o número de critérios e m é o número de alternativas.

O passo preliminar na MCDA é formular as alternativas para solucionar o problema em questão, a partir de um conjunto de critérios pré-estabelecidos, normalizando os dados originais de cada um deles. Em seguida, deve-se determinar a prioridade dos critérios para definir a importância relativa dos mesmos no processo de decisão. Então, com a aplicação de métodos MCDA, obtém-se o *ranking* das alternativas que devem solucionar o problema proposto. Se o mesmo *ranking* for obtido por diversos métodos MCDA, pode-se garantir que a “solução de melhor acordo” foi encontrada. A Figura 14 apresenta o esquema completo de um processo MCDA de tomada de decisão.

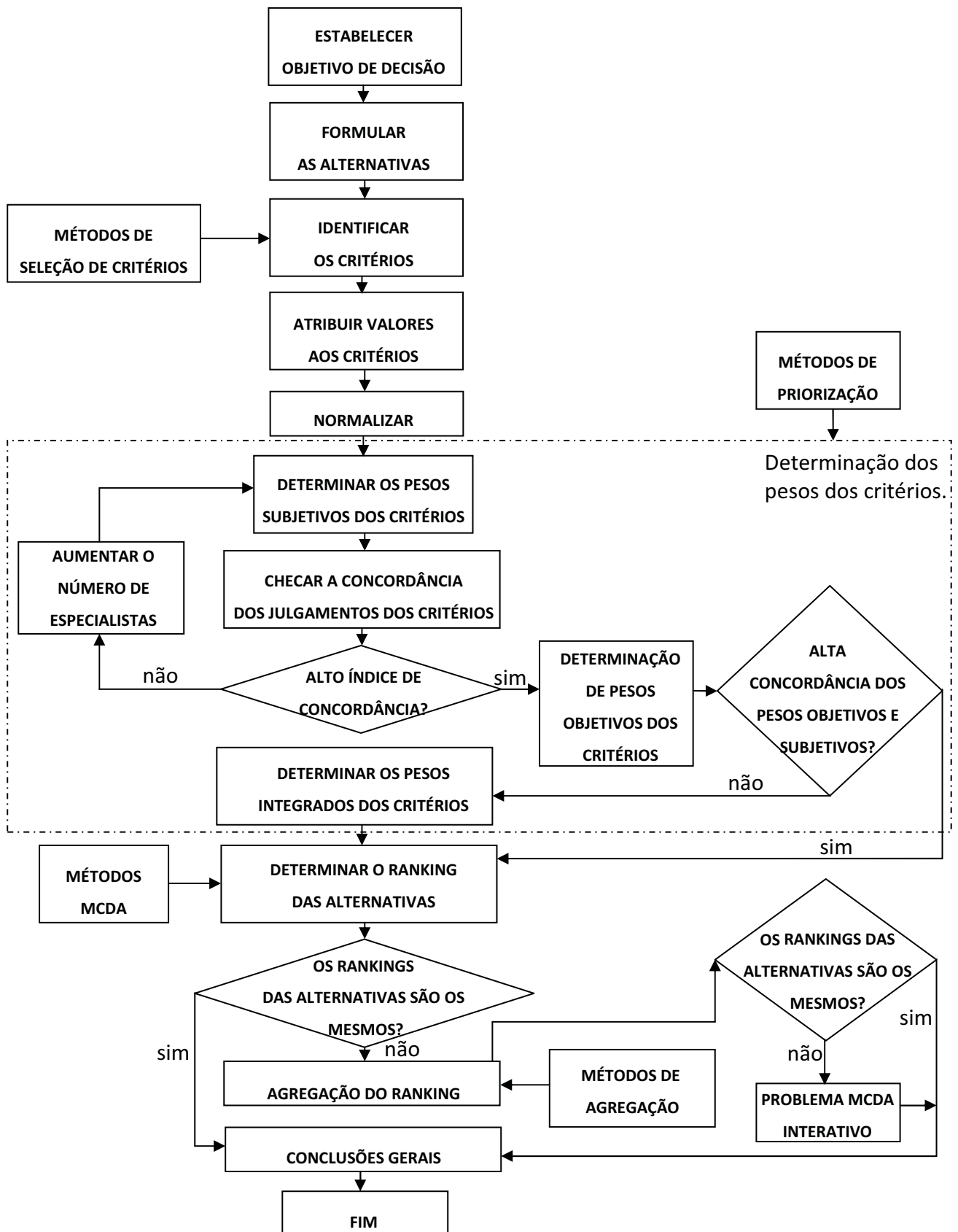


Figura 14 - Processo de Tomada de Decisão MCDA (Adaptado de: WANG et al., 2009).

Geralmente, os seguintes princípios são obedecidos na escolha dos critérios principais de um processo de tomada de decisão:

- Princípio sistêmico: o sistema de critérios deve refletir fielmente a característica essencial e todos os desempenhos relevantes do problema.
- Princípio da consistência: o sistema de critérios deve ser coerente com o objetivo do problema.
- Princípio da independência: os critérios não devem ter relação com os outros de mesmo nível e devem refletir o desempenho das alternativas em diferentes aspectos.
- Princípio da mensurabilidade: os critérios devem ser mensuráveis em valor quantitativo possível ou qualitativamente expressos.
- Princípio da comparabilidade: o resultado do processo de decisão é mais racional quando a comparabilidade dos critérios é mais evidente, tornando, assim, necessária a normalização de seus valores.

O sistema de critérios pode ser estruturado em diversos níveis, de acordo com os propósitos do problema. Eficiência, custo de investimento, emissão de CO₂ e a criação de emprego são os critérios técnico, econômico, ambiental e social, respectivamente, mais utilizados em problemas relacionados à área de energia elétrica.

Segundo Carlsson e Fullér (1996), uma série de pesquisas, como por exemplo, as desenvolvidas por Bana e Costa¹⁹, mostram a vitalidade do campo e da multiplicidade de métodos MCDM que foram desenvolvidos. Quando Bellman e Zadeh²⁰, e alguns anos mais tarde Zimmermann²¹, apresentaram os conjuntos *fuzzy* (*fuzzy sets*) para o campo, abriu-se o caminho para uma nova família de métodos para lidar com os problemas que tinham sido inacessíveis e insolúveis com técnicas MCDM padrão.

Destaca-se que uma decisão incorreta pode ser corrigida, quando informações adicionais são disponibilizadas. Claro que, uma completa falta de informação não vai apoiar qualquer tomada de decisão através de qualquer método. Para problemas difíceis, os métodos convencionais são geralmente caros e dependem de aproximações matemáticas (por exemplo, linearização de problemas não lineares), o que pode levar a resultados imprecisos. Em tais

¹⁹ Bana e Costa, C. A.; Vincke; P. **Multiple criteria decision aid: an overview** apud Bana e Costa, C. A. ed., *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990, p. 3-14.

²⁰ Bellman, R; Zadeh, L.A. **Decision-making in a fuzzy environment**. *Management Science*, 17B, 1970, p.141-164.

²¹ Zimmermann, H.-J. **Fuzzy set theory and its applications**. Dordrecht, Boston, 1985.

Zimmermann, H.-J. **Fuzzy sets, decision-making and expert systems**. Kluwer Academic Publisher, Boston, 1987.

circunstâncias, sistemas *fuzzy* muitas vezes superam os métodos MCDM convencionais (CARLSSON; FULLÉR, 1996).

Em problemas de planejamento energético, o método AHP é o MCDA mais aplicado, sendo que os conjuntos *fuzzy* têm sido utilizados para tratar os critérios qualitativos e as imprecisões inerentes a certos tipos de informações (WANG et al., 2009). Analogamente, este trabalho pretende unir essas duas metodologias para serem aplicadas em problemas de repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas.

4.2 Processo Analítico Hierárquico

O Processo Analítico Hierárquico (AHP), proposto por Saaty (1980), é um método de tomada de decisão que pode lidar com as decisões não estruturadas ou semi-estruturadas, com múltiplos atores e critérios de entradas. O AHP tem uma série de vantagens, incluindo a análise de consistência dos julgamentos, a estruturação de um problema em hierarquia ou em um conjunto de níveis integrados e o fato de demandar conhecimentos matemáticos simples para aplicar o método. Trata-se de um método de auxílio à decisão multicritério (MCDA) que pode ser combinado com outras técnicas de pesquisa operacional e inteligência artificial para lidar com problemas mais complexos (ALY, VRANA, 2008).

O AHP tem como objetivo promover a superação das limitações cognitivas dos tomadores de decisão, sendo muito aplicado para sistematizar problemas de caráter econômico, político, social e ambiental, por ser um método simples, robusto e capaz de avaliar fatores qualitativos e quantitativos, tangíveis ou intangíveis.

O método baseia-se na capacidade humana de usar a informação e a experiência para estimar magnitudes relativas, aliando lógica e intuição, sendo indicado para problemas que envolvem a priorização de soluções potenciais por meio da avaliação de um conjunto de critérios (BOAS, 2006). Em um processo de decisão com estas características, o conhecimento de um especialista é no mínimo tão valioso quanto o conjunto de dados disponíveis, sendo que diferentes decisores podem desenvolver estruturas distintas para a dinâmica de decisão.

O método AHP se divide em estruturação, julgamentos e síntese dos resultados. O decisor define o objetivo geral e, assim, seleciona os critérios para alcançar a meta. Os elementos devem ser estruturados hierarquicamente, conforme apresentado na Figura 15:

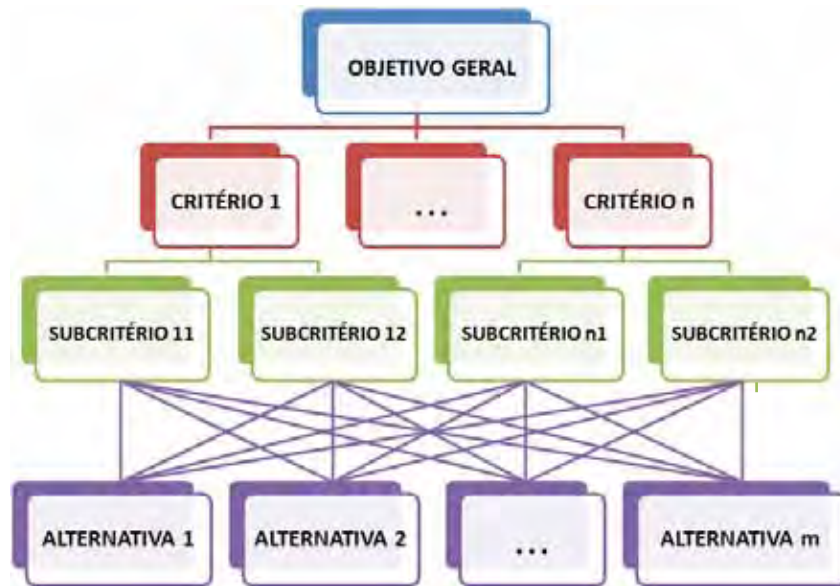


Figura 15 - Estrutura Hierárquica do Problema de Decisão (Adaptado de: SAATY, 1980).

Quanto mais genérico for o critério, mais altos ele deve estar na hierarquia. As alternativas ficam na base, abaixo do último nível de critérios. Esse arranjo permite o decisor focar cada parte e todo o complexo do problema, para que seja possível obter as prioridades através de uma simples comparação paritária, baseada nos dados obtidos pelo usuário.

A próxima etapa é a elaboração da Matriz de Prioridade dos Critérios, a partir dos julgamentos par a par dos elementos feitos por especialistas, com base na Escala Fundamental de Saaty, apresentada no Quadro 3:

Quadro 3 - Escala Fundamental de Saaty (Adaptado de: SAATY, 1991).

GRAU DE IMPORTÂNCIA	DEFINIÇÃO	EXPLICAÇÃO
1	Igual Importância	Os dois elementos de juízo contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância Moderada	A experiência e o julgamento favorecem um elemento em relação ao outro.
5	Importância Forte ou Essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um elemento em relação ao outro.
7	Importância Muito Forte ou Demonstrada	Um elemento é muito fortemente favorecido em relação ao outro; sua dominação de importância pode ser demonstrada.
9	Importância Absoluta	A evidência favorece um elemento em relação ao outro, com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores Intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

A matriz de prioridade dos critérios é uma matriz quadrada recíproca positiva de ordem n , com valores unitários na diagonal principal e sendo a_{ij} o julgamento de importância entre os pares de critérios, de acordo com a escala apresentada no Quadro 3. O formato geral de uma matriz de prioridade é apresentado na Figura 16:

CRITÉRIOS	C_1	C_2	C_3	...	C_n
C_1	1	a_{12}	a_{13}	...	a_{1n}
C_2	$a_{21} = 1/a_{12}$	1	a_{23}	...	a_{2n}
C_3	$a_{31} = 1/a_{13}$	$a_{32} = 1/a_{23}$	1	...	a_{3n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
C_n	$a_{n1} = 1/a_{1n}$	$a_{n2} = 1/a_{2n}$	$a_{n3} = 1/a_{3n}$...	1

Figura 16 - Formato Geral da Matriz de Prioridade (AHP) (Fonte: Elaborado pelo autor).

A construção da matriz de prioridade se inicia preenchendo primeiro as lacunas com os julgamentos dos elementos das linhas com maior importância em relação aos elementos das colunas para, então, preencher as posições recíprocas com o valor inverso dos julgamentos já realizados. Havendo mais de um especialista, deve-se fazer a agregação dos julgamentos, sendo os métodos mais utilizados o cálculo por média ponderada ou pela média geométrica dos mesmos.

É uma grande vantagem do método AHP permitir que o usuário atribua pesos relativos para os múltiplos critérios, ou múltiplas alternativas para um dado critério, de forma intuitiva, ao mesmo tempo em que estabelece uma comparação entre os mesmos. Ainda que duas variáveis sejam aparentemente incomparáveis, com o conhecimento e a experiência dos especialistas, pode-se reconhecer qual a relação de importância entre os critérios (SAATY, 1991).

Definidas as matrizes de prioridade, deve-se calcular o autovetor r que determina os pesos locais para cada critério nos diversos níveis hierárquicos em relação às alternativas em análise. O autovetor r é calculado a partir da média geométrica dos elementos de cada linha da matriz de prioridade, conforme a equação (4):

$$\mathbf{r} = [r_i]$$

$$r_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (4)$$

Os elementos de r devem ser normalizados, dando origem ao vetor w que determina a prioridade dos critérios de forma global, conforme a equação (5) (SAATY, 1991):

$$\mathbf{w} = [w_i]$$

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (5)$$

Segundo Saaty (1980), as matrizes de prioridade dos critérios, cuja ordem seja igual ou superior a 3, devem ser submetidas ao teste de consistência. Quando uma matriz de julgamentos apresenta todos os julgamentos coerentes entre si, tem-se $\lambda_{m\acute{a}x} = n$, onde n é a ordem da matriz de julgamentos. O autovalor λ é obtido pela equação (6), sendo w o autovetor de prioridade dos critérios da matriz de julgamentos A :

$$A \times w = \lambda \times w \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_i]$$

A determinação de $\lambda_{m\acute{a}x}$ é feita através da equação (7):

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad (7)$$

Quando $\lambda_{m\acute{a}x} > n$, os julgamentos não são 100% coerentes entre si (SALOMON, 2004). A Razão de Consistência (*Consistency Ratio – CR*) é um indicador da coerência dos julgamentos, que considera o afastamento entre $\lambda_{m\acute{a}x}$ e n , conforme a equação (8), e também um erro aleatório associado à ordem da matriz de prioridade, *RI* (*Random Index – Índice Aleatório*), apresentado na Tabela 2:

$$CR = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{(n - 1) \times RI} \quad (8)$$

Tabela 2 - Índices Aleatórios para Matrizes de Ordem $n = 3, \dots, 10$ (Adaptado de: SAATY, 1980).

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

A Razão de Consistência (CR) da hierarquia deve ser inferior ou no máximo igual a 10% (0,10), caso contrário, os julgamentos devem ser reavaliados (SAATY, 1980).

O *ranking* de decisão, representado pelo vetor x , resulta da multiplicação da matriz de decisão das alternativas H , formada pelas quantidades atribuídas a critério referentes a cada uma das alternativas, devidamente normalizadas, pelo vetor de prioridade dos critérios, de acordo com a equação (9):

$$x = H \times w \quad (9)$$

A melhor alternativa refere-se ao maior valor encontrado para o vetor x , seguindo esta premissa para se obter a ordenação das demais alternativas.

4.3 Limitações do método AHP

O método AHP é considerado um dos principais métodos MCDA, capaz de resolver uma grande variedade de problemas envolvendo critérios complexos em diversos níveis (ZANGENEH et al., 2009). Entretanto, alguns pesquisadores suscitaram algumas dúvidas sobre o AHP, destacando algumas fragilidades do método, tais como (BOAS, 2006; ALY; VRANA, 2008):

- Requer procedimento para estruturar o questionário de perguntas e preferências;
- O trabalho computacional é sensivelmente maior quando se eleva o número de alternativas;
- O número de comparações requeridas pode ser muito alto;
- Alternativas absolutamente incomparáveis não são permitidas;
- As prioridades dependem do método usado para derivá-las;
- Existem falhas verificadas em métodos de agregação de pesos individuais;
- Os julgamentos humanos são representados por uma escala discreta de 1 a 9 (ou *crisp*, de acordo com a terminologia da lógica *fuzzy*), que embora tenha a vantagem da simplicidade, não reproduz adequadamente as incertezas e imprecisões associadas ao mapeamento da percepção do especialista.

Principalmente com base nesta última limitação do método, é que este trabalho pretende associar a teoria dos conjuntos *fuzzy* ao AHP, a fim de proporcionar um tratamento mais

qualificado às informações não quantificáveis, incompletas ou parcialmente conhecidas. A metodologia *fuzzy*-AHP a ser utilizada para definir o melhor tipo de repotenciação que deve ser efetuada em uma determinada PCH, baseada nos artigos publicados por Triantaphyllou e Lin (1996), Aly e Vrana (2008), Chang e Wang (2009) e Meixner (2009), é apresentada no Capítulo 5 deste trabalho.

4.4 Teoria dos conjuntos *fuzzy* aplicada a MCDA

Descrever matematicamente situações reais que envolvem as incertezas inerentes do raciocínio humano é algo complexo. A teoria dos conjuntos *fuzzy* tem como objetivo capturar esses parâmetros cognitivos e estruturá-los quantitativamente, de modo que possam ser integradas aos métodos de tomada de decisão, tornando o processo mais eficiente (BELCHIOR et al., 1997).

A teoria *fuzzy* possibilita o modelamento de um sistema, representando-o de forma mais realista e flexível ao admitir valores lógicos intermediários entre a afirmação e a negação de uma proposição (MELO, 2009). Apesar de existir uma complexa base formal sustentando, por exemplo, seu uso na modelagem e controle de sistemas, este trabalho pretende evidenciar somente o necessário para o entendimento de como a teoria *fuzzy* pode ser aplicada a problemas de auxílio à decisão multicriterial.

Na teoria de conjuntos clássica, também conhecida como conjuntos *crisp* (*crisp sets*), um elemento pertence ou não a um dado conjunto. Dado um universo X e um elemento particular $x \in X$, o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com respeito a um conjunto $A \subseteq X$ é dado por (GOMIDE et al., 1995):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

A função $\mu_A(x): X \rightarrow \{0,1\}$ é chamada de função característica na teoria clássica de conjuntos. Frequentemente, uma generalização desta idéia é utilizada para manipulação de dados com erros limitados. Todos os números terão grau de pertinência 1, tendo todos os demais grau de pertinência 0, conforme a Figura 17:

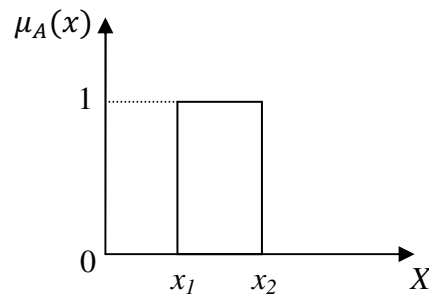


Figura 17 - Função de Pertinência: Conjunto Crisp (Fonte: Elaborado pelo autor).

Em um conjunto *fuzzy* (*fuzzy sets*), representado por \tilde{A} em X , cada elemento x pode ter um grau de pertinência, usualmente no intervalo real $[0, 1]$, em decorrência de sua função de pertinência característica, representando o quanto um elemento pertence ou não ao conjunto. Portanto, cada função de pertinência mapeia elementos de um dado conjunto universo X , para um número real em $[0, 1]$. Em casos limites, se o grau de pertinência é 0, o elemento não pertence ao conjunto e, se é 1, o elemento pertence 100% ao conjunto (BELCHIOR et al., 1997). Pode-se dizer que o conjunto *fuzzy* generaliza o conceito representado pelos conjuntos clássicos (*crisp sets*) (MELO, 2009).

A definição de conjuntos *fuzzy*, segundo Zadeh (1965), pode ser reescrita para tratar de pontos discretos, conforme segue: seja X um conjunto arbitrário, enumerável ou não, onde $x \in X$ e $\tilde{A} \subseteq X$, então o conjunto *fuzzy* \tilde{A} é um conjunto de pares ordenados $\{(x, \mu_{\tilde{A}}(x))\}, \forall x \in X$. Os conjuntos *fuzzy* são matematicamente construídos pela associação de cada elemento do domínio X a um valor, que irá representar o grau de pertinência deste elemento ao conjunto.

O grau de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ não pode ser confundido com a probabilidade de um acontecimento. Na verdade, ele representa uma medida de compatibilidade de um objeto com o conceito representado pelo conjunto *fuzzy*. Este valor é a definição mais importante para se entender a teoria *fuzzy*, já que esta se baseia na ponderação de elementos, identificados com o termo lingüístico que representa o conjunto (MELO, 2009).

Em um processo de avaliação de parâmetros qualitativos, os dados obtidos dos especialistas apresentam um certo grau de incerteza e contêm muitas ambigüidades, principalmente, em virtude de como foram capturados. A origem dessas ambigüidades pode ser (RÖMER; KANDEL, 1995):

- a não aferição dos dispositivos utilizados, envolvendo erros de medição de natureza *fuzzy*;
- a natureza lingüística dos dados observados;
- a natureza subjetiva dos dados obtidos.

Muitas informações vagas podem ser convenientemente modeladas por funções de pertinência *fuzzy* (RUONING; XIAOYAN, 1992). Um número *fuzzy* \tilde{N} (ou um intervalo *fuzzy*) é um conjunto *fuzzy* convexo e normalizado definido no conjunto dos números reais \mathbb{R} , tal que sua função de pertinência tem a forma (ZIMMERMANN, 1991):

$$\mu_{\tilde{A}}: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$$

Um conjunto *fuzzy* deve capturar a concepção intuitiva de números ou intervalos aproximados, tal como “valores que estão próximos de um certo número real”, ou “valores que estão em torno de um dado intervalo de números reais”. Tais conceitos são essenciais para a caracterização dos estados das variáveis *fuzzy* e, conseqüentemente, são importantes para aplicações, tais como: controle *fuzzy*, tomada de decisão, raciocínio aproximado e estatística.

Para qualificar um número *fuzzy*, um conjunto *fuzzy* \tilde{A} em \mathbb{R} deve possuir, no mínimo, as seguintes propriedades (ZIMMERMANN, 1991):

- \tilde{A} deve ser um conjunto *fuzzy* normalizado;
- \tilde{A}_α deve ser um intervalo fechado para todo $\alpha \in (0, 1]$, isto é, todo número *fuzzy* é convexo;
- O suporte de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} em um universo de discurso X , o qual contém todos os elementos de X com graus de pertinência diferentes de zero, deve ser limitado.

Em diversas aplicações MCDA, as funções de pertinência *fuzzy* têm as formas triangular (dado pela proposição “próximo a m ”) ou trapezoidal (conjunto *fuzzy* com uma região plana), conforme apresentadas nas Figuras 18 (a) e 18 (b), respectivamente:

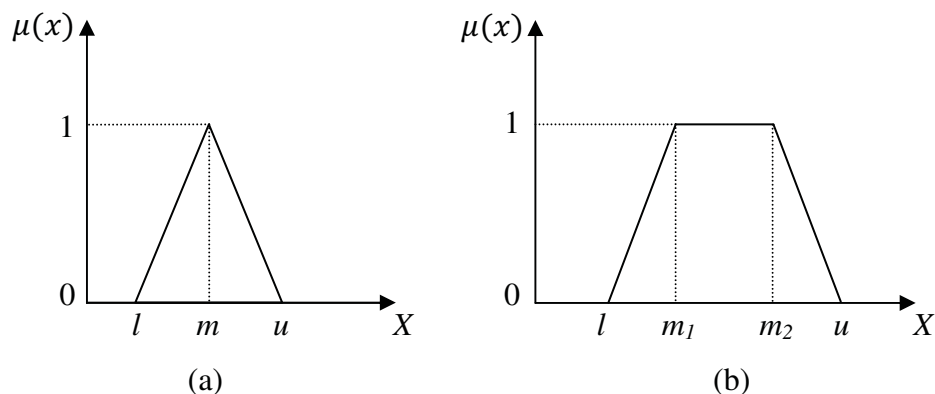


Figura 18 - Funções de Pertinência: Conjuntos Fuzzy (Fonte: Elaborado pelo autor).

Um conjunto *fuzzy* \tilde{N} é definido como uma função de pertinência *fuzzy* triangular, se (MEIXNER, 2009):

$$\mu_{\tilde{N}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & \text{para } l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & \text{para } m \leq x \leq u \\ 0, & \text{para } x < l \text{ e } x > u \end{cases}$$

Sendo: l , a extremidade inferior (*lower*), u a extremidade superior (*upper*) e m o valor modal (*modal*), no qual $\mu_{\tilde{N}}(x) = 1$, da função de pertinência triangular \tilde{N} , que pode ser representada por (l, m, u) .

Se m não é um número real, mas um intervalo $[m_1, m_2]$, a função de pertinência \tilde{N} se transforma em um intervalo *fuzzy* (função de pertinência *fuzzy* trapezoidal), representado por (l, m_1, m_2, u) , sendo (KAHRAMAN et al., 2009):

$$\mu_{\tilde{N}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m_1-l}, & \text{para } l \leq x \leq m_1 \\ 1, & \text{para } m_1 \leq x \leq m_2 \\ \frac{u-x}{u-m_2}, & \text{para } m_2 \leq x \leq u \\ 0, & \text{para } x < l \text{ e } x > u \end{cases}$$

A teoria dos conjuntos *fuzzy* é utilizada no raciocínio aproximado, para efetivamente manusear a ambigüidade envolvida na avaliação de dados e em propriedades imprecisas de variáveis lingüísticas. Uma variável lingüística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um dado processo poderia ser uma variável lingüística assumindo valores baixa, média e alta, sendo descrita por intermédio de conjuntos *fuzzy*, conforme apresentado na Figura 19 (GOMIDE et a., 1995):

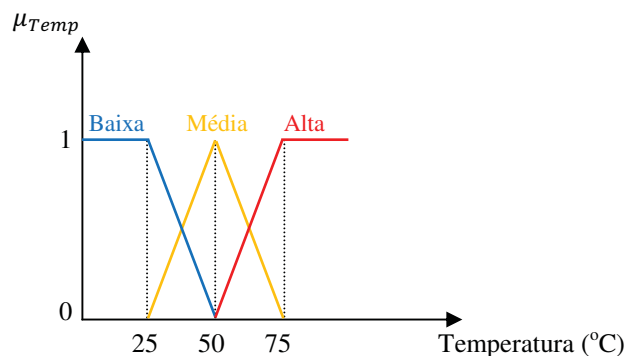


Figura 19 - Variável Lingüística: Temperatura (Adaptado de: GOMIDE et a., 1995).

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição lingüística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de mecanismos matemáticos convencionais (GOMIDE et al., 1995).

Este processo de atribuir valores lingüísticos, definidos por funções de pertinência, às variáveis de entrada numéricas é denominado fuzzificação. A fuzzificação pode seguir três estratégias básicas (MELO, 2009):

- Dados de entrada quaisquer são convertidos em uma função de pertinência *fuzzy* em um universo de discurso apropriado.
- Dados de entrada quaisquer são convertidos em um vetor *fuzzy* baseado em conhecimento especialista das características dos instrumentos de medida, conversão A/D e normalização.
- Dados de entrada quaisquer são aleatoriamente distribuídos, podendo ser convertidos em um vetor *fuzzy* com forma arbitrária.

Depois de concluída a fuzzificação, a próxima etapa é submeter os conjuntos *fuzzy* ao processo de inferência. Pode-se definir a inferência *fuzzy* como o processo pelo qual se obtém as conclusões ou saídas de um dado sistema, pela avaliação dos níveis de compatibilidade das entradas com as condições impostas pela referida base de regras. Nesta etapa, o sistema de inferência aplica operações, resultando em um conjunto *fuzzy* de saída, que resultará em um valor numérico, após a fase de defuzzificação (MELO, 2009).

Considerando o amplo universo que envolve as teorias de operações *fuzzy* existentes, destacam-se, principalmente, as utilizadas na metodologia de auxílio à decisão proposta neste trabalho, visto que alguns dos dados de entrada são funções de pertinência *fuzzy* triangulares. A decisão de se utilizar as funções de pertinência *fuzzy* triangulares se baseia no fato de que são mais simples que as trapezoidais e têm gerado resultados bastante satisfatórios quando associados ao método AHP (TRIANANTAPHYLLOU; LIN, 1996; MEIXNER, 2007; ALY; VRANA, 2008). Sendo duas funções de pertinência *fuzzy* triangulares $\tilde{N}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ e $\tilde{N}_2 = (l_2, m_2, u_2)$, as operações aritméticas básicas mais relevantes são:

- $\tilde{N}_1 \oplus \tilde{N}_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$ para adição
- $\tilde{N}_1 \otimes \tilde{N}_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2)$ para multiplicação

- $1/\tilde{N}_1 \cong (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1)$ para valor recíproco
- $\tilde{N}_1/\tilde{N}_2 \cong (l_1/u_2, m_1/m_2, u_1/l_2)$ para divisão
- $(\tilde{N}_1)^n = (l_1^n, m_1^n, u_1^n)$ para potência

Ainda existem quatro operações de conjuntos básicas referentes às funções de pertinência triangulares que devem ser abordadas (MELO, 2009):

- União: Sejam \tilde{A} e \tilde{B} conjuntos *fuzzy* de X , sua união é um conjunto *fuzzy* $\tilde{A} \cup \tilde{B}$, definido por:

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} = \text{Max}[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)] = \tilde{A}(x) \vee \tilde{B}(x), \forall x \in X$$

A função de pertinência da união de dois conjuntos \tilde{A} e \tilde{B} com funções de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ e $\mu_{\tilde{B}}(x)$, respectivamente, pode ser definida como operador máximo (\vee) das duas funções de pertinência individuais. A operação de união *fuzzy* é equivalente ao “OU” da álgebra booleana, tendo como representação gráfica a Figura 20:

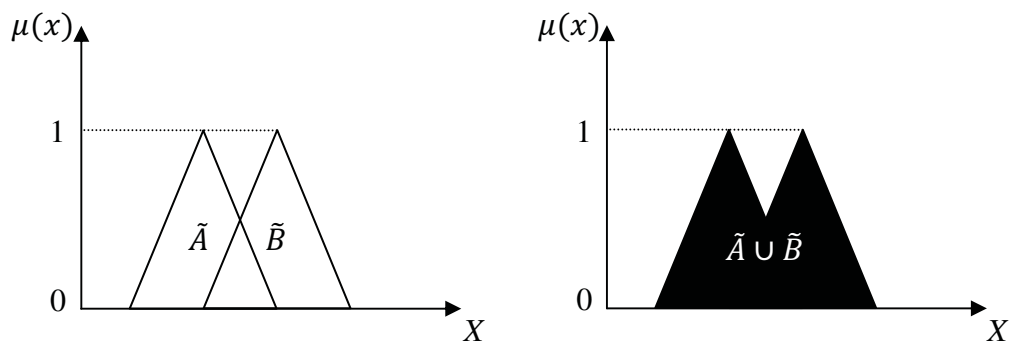


Figura 20 - União de Conjuntos Fuzzy (Adaptado de: MELO, 2009).

- Intersecção: Sejam \tilde{A} e \tilde{B} conjuntos *fuzzy* de X , sua intersecção é um conjunto *fuzzy* $\tilde{A} \cap \tilde{B}$, definido por:

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} = \text{Min}[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)] = \tilde{A}(x) \wedge \tilde{B}(x), \forall x \in X$$

Assim, a função de pertinência da intersecção de dois conjuntos \tilde{A} e \tilde{B} com funções de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ e $\mu_{\tilde{B}}(x)$, respectivamente, pode ser definida como operador mínimo (\wedge) das duas funções de pertinência individuais. A operação de intersecção *fuzzy* é equivalente ao “E” da álgebra booleana, ilustrada na Figura 21:

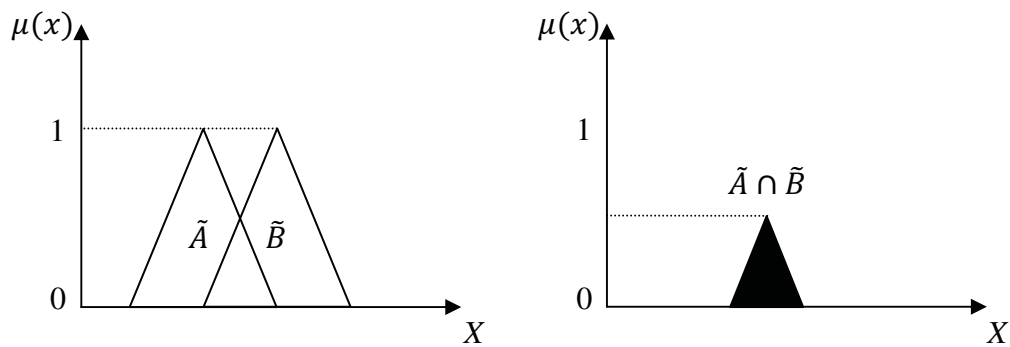


Figura 21 - Intersecção de Conjuntos Fuzzy (Adaptado de: MELO, 2009).

- **Complemento:** Seja \tilde{A} um conjunto *fuzzy* de X , seu complemento (ou negação) é um conjunto *fuzzy* $\tilde{\tilde{A}}$, definido por:

$$\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x), \forall x \in X$$

O complemento de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} é o conjunto de todos os elementos de X que não pertencem a \tilde{A} , conforme apresentado na Figura 22:

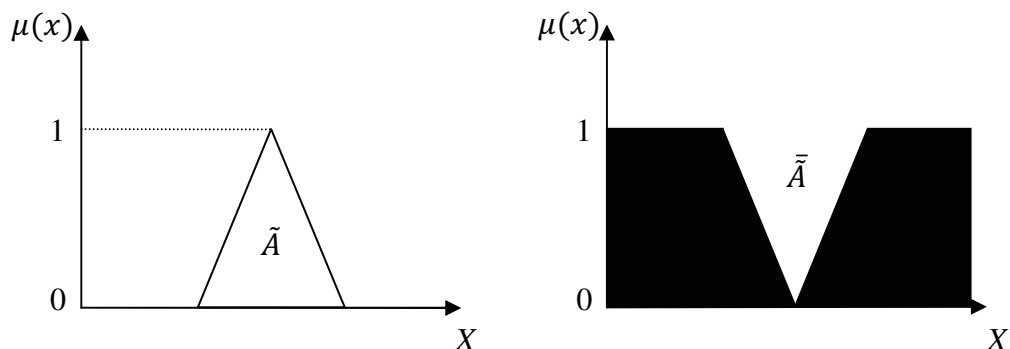


Figura 22 - Complemento de Conjuntos Fuzzy (Adaptado de: MELO, 2009).

Realizado o processo de inferência, os resultados obtidos pelas operações *fuzzy* são defuzzificados. O processo de defuzzificação pode ser definido como uma função que associa a cada conjunto um elemento (do conjunto clássico) que o represente.

Um dos métodos de defuzzificação mais utilizados em problemas MCDA é o Método do Centróide, o qual retorna o centro de área da função inferida. Para a função de pertinência triangular apresentada na Figura 23, sendo x o centro de área (CA), tem-se (CHANG; WANG, 2009):

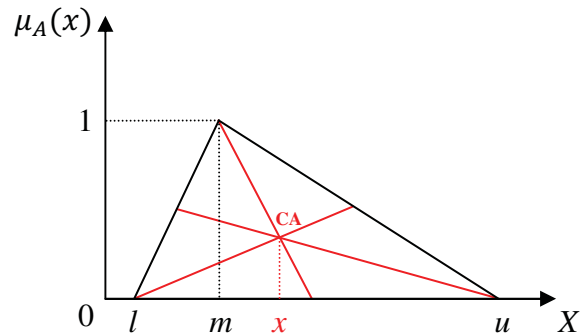


Figura 23 - Centróide de uma Função de Pertinência Triangular (Fonte: Elaborado pelo autor).

$$x = l + \frac{(m - l) + (u - l)}{3} = \frac{l + m + u}{3} \quad (10)$$

A associação dos conjuntos *fuzzy* ao método de decisão multicritério AHP é apresentada com detalhes no Capítulo 5, a partir da estruturação e descrição da metodologia proposta para solucionar o problema de repotenciação de uma PCH.

5 METODOLOGIA PROPOSTA PARA REPOTENCIAÇÃO DE PCHS

Este capítulo apresenta a descrição do problema de decisão, sua estrutura hierárquica, a definição dos critérios, das funções de pertinência e a metodologia *fuzzy*-AHP proposta para ser aplicada em estudos de repotenciação de PCHs.

5.1 Caracterização do problema

A metodologia de auxílio à decisão multicriterial apresentada neste trabalho tem como objetivo definir qual o tipo de repotenciação deve ser implementada em uma determinada PCH. Primeiramente, é necessário fazer um levantamento das condições técnicas em que se encontra a usina e quais as perspectivas de ganho de potência, de acordo com o que está apresentado no Capítulo 3. Sendo assim, devem ser avaliados os seguintes parâmetros:

- A taxa de disponibilidade das unidades geradoras;
- A queda de eficiência das unidades geradoras em relação ao projeto original;
- As perspectivas de ganho de potência instalada a partir de um novo estudo hidrológico, sem interferir no volume do reservatório;
- A possibilidade de aumentar o volume do reservatório;
- As condições técnicas do circuito hidráulico, da turbina, do gerador e do sistema de transformação e transmissão de energia elétrica;
- O tipo de sistema de distribuição: interligado ou isolado (GD);
- A situação de operação da PCH: ativada ou desativada.

A partir do levantamento desses dados, o próximo passo é montar os possíveis cenários de repotenciação, sendo eles:

- Mínima
- Leve
- Pesada
- Reconstrução

Cada cenário é composto por critérios de decisão quantitativos e qualitativos. Os critérios quantitativos assumem valores absolutos, enquanto os qualitativos apresentam certo grau de incerteza, natural da linguagem humana, e devem ser fornecidos por especialistas.

A estrutura hierárquica para a seleção do tipo de repotenciação a ser implementada em uma determinada PCH é apresentada na Figura 24:

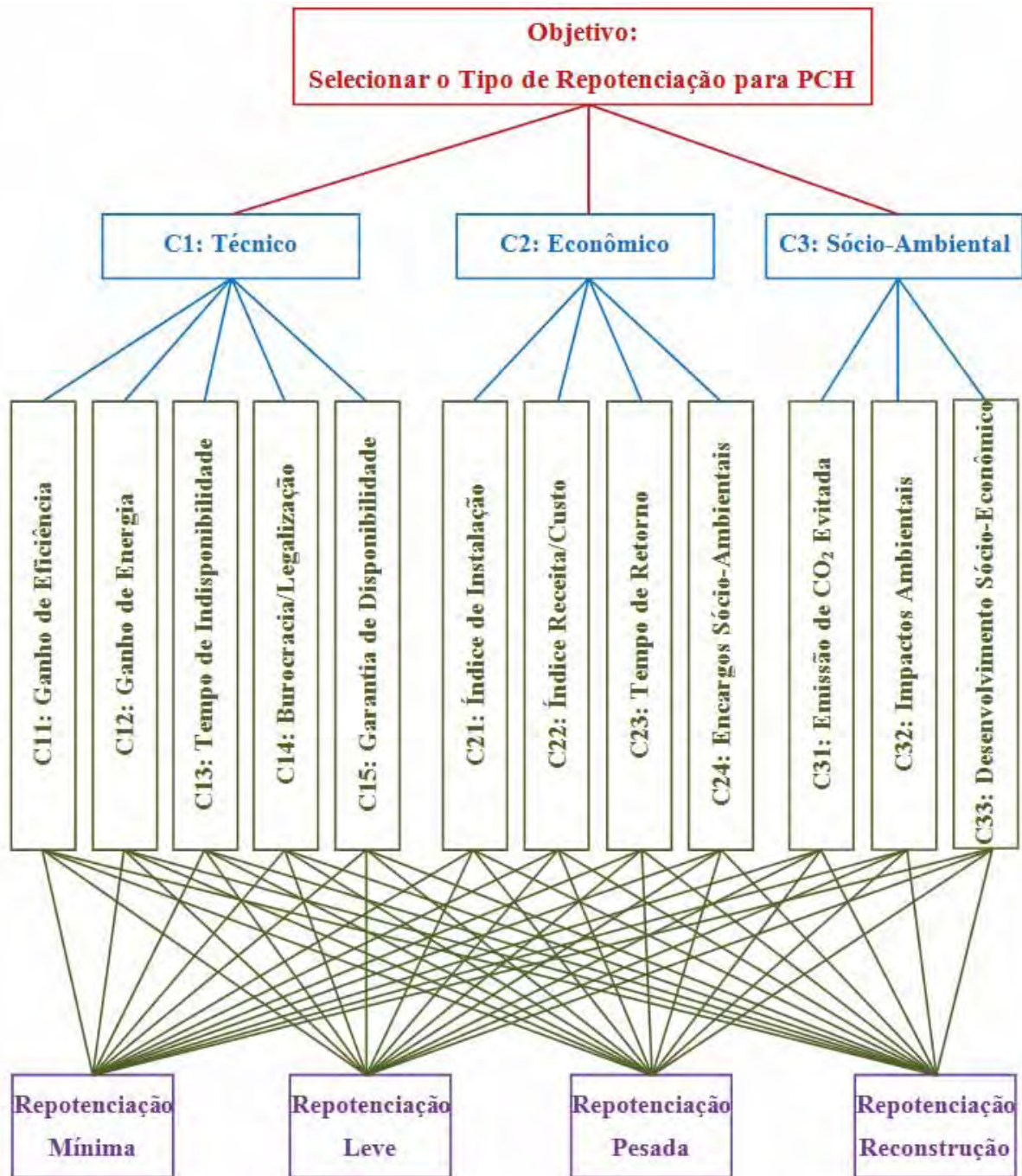


Figura 24 - Estrutura Hierárquica: Repotenciação de PCH (Fonte: Elaborado pelo autor).

O método de decisão a ser utilizado para determinar o tipo de repotenciação a ser implementado utiliza o mesmo procedimento do modelo clássico AHP, entretanto, para a determinação das prioridades dos critérios, bem como para os valores de entrada qualitativos, são utilizados conjuntos *fuzzy* (ALY, VRANA, 2008). Conforme apresentado no Capítulo 4, a assertividade dos resultados obtidos através da aplicação da lógica *fuzzy* está diretamente associada ao nível de conhecimento e experiência dos especialistas da área, responsáveis por

atribuir valores lingüísticos às respectivas variáveis, bem como definir a prioridade dos critérios no processo de tomada de decisão.

5.2 Definição dos critérios

A tomada de decisão sobre qual o tipo de repotenciação deve ser implementada em uma determinada PCH, conforme a hierarquia apresentada na Figura 24, está estruturada em dois níveis, sendo o primeiro formado por 3 critérios principais: técnico, econômico, sócio-ambiental. O segundo nível é composto por 12 subcritérios, de caráter quantitativo e qualitativo, sendo 5 técnicos, 4 econômicos e 3 sócio-ambientais, descritos a seguir:

1) Critério Técnico:

1.1) Subcritérios Quantitativos:

- Ganho de Eficiência: trata-se do ganho obtido na relação entre potência gerada e potência instalada. Este fator pode ser melhorado a partir do melhor aproveitamento do potencial hidráulico, bem como com ações que aumentem da eficiência das unidades geradoras.
- Ganho de Energia: refere-se ao ganho de potência elétrica gerada para o sistema elétrico e pode ser obtido através de intervenções nos equipamentos eletromecânicos e no circuito hidráulico, que promovam aumento de rendimento na geração ou mesmo com a substituição das unidades de geração quando é verificada a possibilidade de elevar a capacidade instalada a partir de novos estudos hidrológicos. Para usinas desativadas, toda capacidade de geração é considerada ganho de energia obtido com a repotenciação.
- Tempo de Indisponibilidade: é o tempo de parada de geração de energia elétrica pela usina para que a mesma seja submetida às intervenções do respectivo tipo de repotenciação.

1.2) Subcritérios Qualitativos:

- Burocracia/Legalização: refere-se às ações de ordem burocrática junto aos órgãos responsáveis por analisar e aprovar projetos e obras de repotenciação de PCHs. Dependendo do tipo de repotenciação, a usina deve apresentar um novo Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) e obter novas licenças.

- Garantia de Disponibilidade: refere-se à garantia de fornecimento de energia que é prejudicada por falhas nos sistemas de geração e transmissão de energia e paradas para manutenções.

2) Critérios Econômicos:

2.1) Subcritérios Quantitativos

- Índice da Instalação: é a relação entre o custo total da repotenciação e o ganho de potência instalada em R\$/kW, sendo um índice econômico de comparação entre as diversas opções de investimento.
- Índice Receita/Custo: trata-se da relação entre a receita e o custo da energia produzida anualmente para um tempo de amortização de cinco anos, considerado um índice de viabilidade econômica pelos investidores. O custo da energia produzida é determinado pela somatória de todas as despesas anuais (operacionais e as destinadas a repotenciação, considerando o prazo de amortização). A receita é definida a partir da comercialização da energia elétrica, podendo ser incluídos os créditos de carbono que podem ser gerados com a repotenciação anualmente.
- Tempo de Retorno: é o tempo (em anos) necessário para a amortização do investimento destinado à implementação do respectivo tipo de repotenciação. É calculada a partir do investimento inicial e dos ganhos anuais, garantindo uma reserva de capital anual de 10% da receita total e considerando as devidas taxas de juros de financiamentos.

2.2) Subcritérios Qualitativos

- Encargos Sócio-Ambientais: está relacionado aos custos destinados a projetos de mitigação, projeto MDL, compensações financeiras, e legalização de ordem ambiental e social. Esta variável é tratada neste trabalho como sendo qualitativa, devido à dificuldade de se computar os valores exatos destes encargos.

3) Critérios Sócio-Ambientais:

3.1) Subcritérios Quantitativos

- Emissão de CO₂ Evitada: também tratada como crédito de carbono, refere-se às toneladas de CO₂e que deixam de ser emitidas anualmente na atmosfera pelo fato da repotenciação de PCH proporcionar um ganho de energia limpa no sistema elétrico, contribuindo para o

atraso do acionamento ou mesmo para a desativação de usinas termelétricas abastecidas com combustível fóssil. Este valor é calculado multiplicando-se o ganho de MWh produzido anualmente pela usina a partir da repotenciação pelo fator de emissão (medido em tCO_2e/MWh), apresentado no Capítulo 3.

3.2) Subcritérios Qualitativos

- Impactos Ambientais: trata-se de uma variável destinada a avaliar o nível dos impactos ambientais negativos gerados com a obra de repotenciação.
- Desenvolvimento Sócio-Econômico: refere-se aos impactos que a repotenciação pode gerar na economia, no desenvolvimento e na qualidade de vida da comunidade local.

5.3 Definição dos conjuntos *fuzzy*

Nesta seção são apresentadas as funções de pertinência *fuzzy* a serem utilizadas na determinação das prioridades dos critérios e nos julgamentos dos critérios qualitativos propostos neste trabalho.

A função de pertinência para a definição da prioridade dos critérios par a par é apresentada na Figura 25, sendo os graus de importância (ALY; VRANA, 2008):

S – Similar (0,5 , 1,0 , 1,5): os dois critérios contribuem de forma similar para o objetivo.

B – Baixo (1,0 , 1,5 , 2,0): um critério contribui um pouco mais que o outro para o objetivo.

M – Médio (1,5 , 2,0 , 2,5): um critério contribui mais que o outro para o objetivo.

E – Elevado (2,0 , 2,5 , 3,0): um critério contribui muito mais que o outro para o objetivo.

A – Absoluto (2,5 , 3,0 , 3,5): que um critério contribui absolutamente mais que o outro para o objetivo.

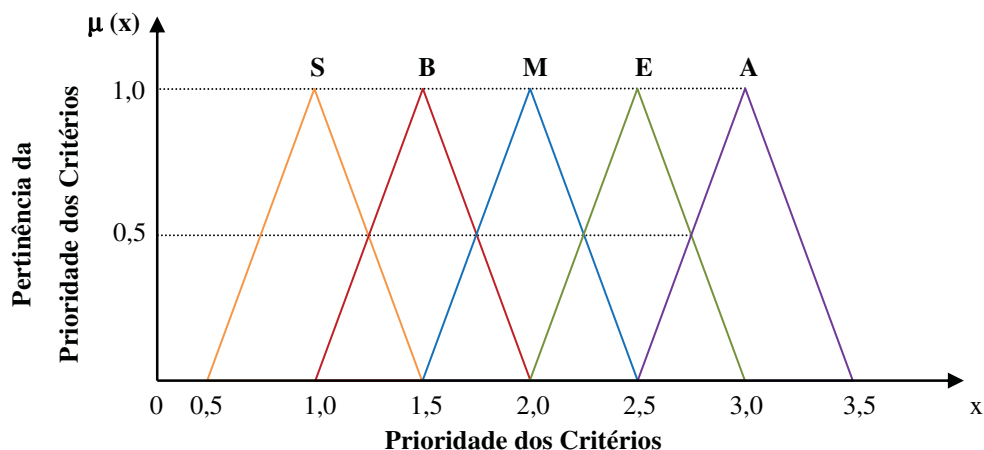


Figura 25 - Função de Pertinência: Prioridade dos Critérios (Fonte: Elaborado pelo autor).

Semelhanamente à Escala Fundamental de Saaty apresentada no Quadro 3 do Capítulo 4, a Figura 25 apresenta cinco funções de pertinência *fuzzy* triangular a serem utilizadas nos julgamentos de prioridade entre os pares de critérios. A condição $x = 0$ é inexistente para um julgamento de importância, justificando o início das funções de pertinência em 0,5.

A vantagem que se percebe em adotar conjuntos *fuzzy* para os julgamentos é que os níveis intermediários da Escala de Saaty são naturalmente contemplados em uma função de pertinência *fuzzy* triangular, traduzindo melhor as incertezas inerentes ao raciocínio humano.

A função de pertinência desenvolvida para os julgamentos do subcritério técnico “Burocracia/Legalização” está apresentada na Figura 26, sendo:

P – Pouca (0 , 2,5 , 5,0): refere-se aos casos em que o processo de repotenciação envolve pouca burocracia para outorga, como nos casos em que não há alteração da potência instalada, não são necessárias interferências territoriais e não são avaliados novos impactos sócio-ambientais.

M – Média (2,5 , 5,0 , 7,5): refere-se a casos que envolvem mais burocracia, como quando se altera a potência instalada e/ou se modifica parâmetros de transmissão, mas sem interferir no volume do reservatório e não sendo verificados novos impactos sócio-ambientais.

E – Elevada (5,0 , 7,5 , 10): remete-se aos casos que envolvem muita burocracia, como quando ocorrem interferências territoriais, alteração do volume do reservatório, desmatamento e verifica-se a necessidade de elaborar novo Relatório de Impactos Ambiental.

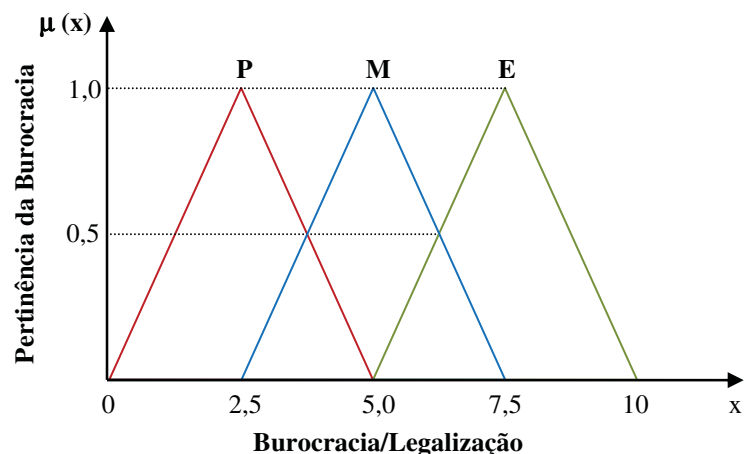


Figura 26 - Função de Pertinência: Burocracia/Legalização (Fonte: Elaborado pelo autor).

A Figura 27 refere-se à função de pertinência elaborada para os julgamentos do subcritério técnico “Garantia de Disponibilidade”, que considera:

P – Pouca (0 , 2,5 , 5,0): julga-se que se obtém pouca redução das ocorrências de indisponibilidade de energia no sistema pela usina, como em casos em que se realizam apenas reparos simples necessários para a continuidade de operação dos equipamentos, não garantindo muita eficiência na redução de paradas não programadas.

M – Média (2,5 , 5,0 , 7,5): considera-se que as ocorrências de indisponibilidade de energia pela usina apresentam redução significativa, podendo ser resultado de repotenciação que envolve a substituição das unidades geradoras ou de suas peças mais desgastadas, realiza-se a reabilitação dos principais componentes do circuito hidráulico e do sistema de transmissão, gerando redução de paradas não programadas.

E – Elevada (5,0 , 7,5 , 10): considera-se que são raras as ocorrências de indisponibilidade de energia pela usina, podendo ser resultado da substituição de equipamentos antigos por novos equipamentos mais eficientes e da implementação de ações de modernização, promovendo a redução de paradas não programadas e extensão de vida útil da usina.

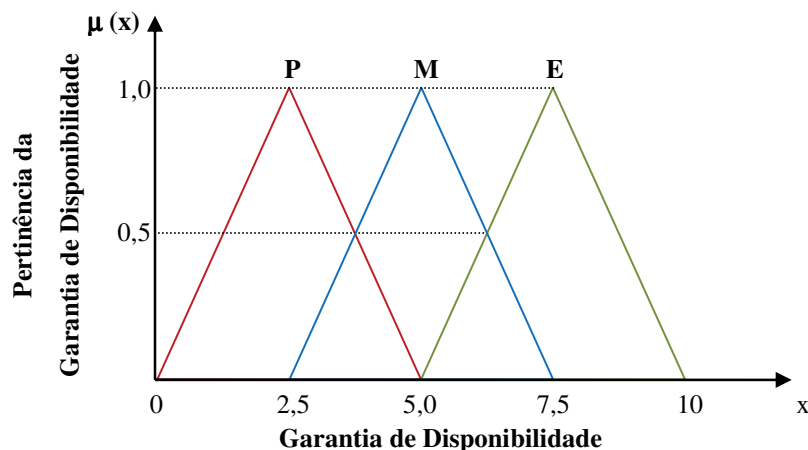


Figura 27 - Função de Pertinência: Garantia de Disponibilidade (Fonte: Elaborado pelo autor).

O subcritério econômico “Encargos Sócio-Ambientais” é tratado neste trabalho como uma variável *fuzzy* devido ao seu elevado grau de incerteza, não sendo desprezado por ser considerado um importante fator de decisão sobre a viabilidade econômica do empreendimento. Gastos com documentos e estudos exigidos, pagamento de taxas de licenciamento e a própria gestão do processo que o empreendedor realiza, bem como os gastos do projeto associados aos impactos ambientais que são exigidos por lei, resultantes das condicionantes da avaliação ambiental ou decorrentes de decisões ou acordos judiciais podem elevar o custo agregado da energia gerada.

De acordo com a Eletrobrás, os gastos sócio-ambientais representam cerca de 10% do custo total da implantação de um empreendimento, enquanto estudos desenvolvidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2005 estimam que essa participação esteja entre 2% e 37% (BANCO MUNDIAL, 2008). Entretanto, 75% desses custos referem-se aos gastos associados à compra de terrenos, infra-estrutura e realocação de população, que no caso da repotenciação esses custos não existem. Fica evidente que sua exata determinação é extremamente complexa, não encontrando na literatura nenhum estudo que apresentasse detalhamento de tais valores para serem utilizados como referência.

Quanto aos custos de transação para a obtenção de créditos de carbono, para projetos MDL de pequena escala, onde se enquadra a repotenciação de PCHs, os valores podem variar de US\$ 23 mil a US\$ 78 mil, segundo De Gouvello e Coto (2003). A própria receita obtida com a comercialização dos créditos de carbono pode ser utilizada para cobrir este gasto, entretanto, dependendo da quantidade de créditos gerada no projeto, este investimento pode ser inviabilizado. Estima-se que a obtenção de créditos de carbono é viável para empreendimentos que gerem no mínimo 10.000 tCO₂ por ano.

A função de pertinência proposta para os julgamentos do subcritério “Encargos Sócio-Ambientais” está apresentada na Figura 28:

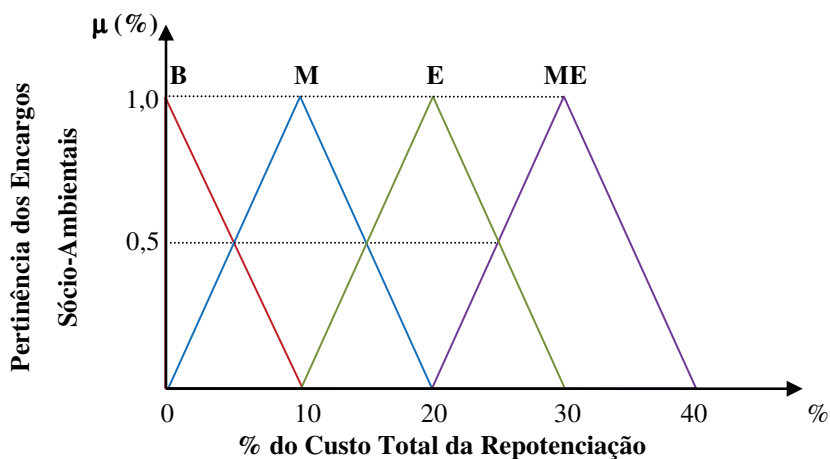


Figura 28 - Função de Pertinência: Encargos Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

No caso dos “Encargos Sócio-Ambientais”, as funções de pertinência triangulares são porcentagem do custo total da repotenciação e têm como base o estudo da EPE de 2005, mencionado anteriormente, sendo:

B – Baixo (0 , 0 , 10): considera-se um baixo custo para encargos sócio-ambientais, podendo representar apenas gastos com documentação e legalizações para regularizar a situação.

M – Médio (0 , 10 , 20): considera-se um custo mediano, podendo neste caso envolver gastos com a renovação de licenças ou elaboração de novo EIA/RIMA.

E – Elevado (10 , 20 , 30): considera-se um custo elevado, podendo ser estes gastos com novos EIA/RIMA, renovação de licenças, ações de mitigação ou relacionados à transação para a obtenção de créditos de carbono.

ME – Muito Elevado (20 , 30 , 40): considera-se um custo muito elevado, envolvendo todos os encargos possíveis, incluindo os custos para a obtenção de créditos de carbono.

A função de pertinência desenvolvida para os julgamentos do subcritério sócio-ambiental “Impactos Ambientais” está apresentada na Figura 29, sendo:

P – Pouco (0 , 2,5 , 5,0): considera-se que a repotenciação gera pouco ou irrelevante impacto ambiental, como é o caso em que não há alteração do nível do reservatório, do circuito hidráulico, da infraestrutura geral da usina, não havendo a necessidade de elaboração de novo EIA/RIMA e de obtenção de novas licenças.

M – Médio (2,5 , 5,0 , 7,5): considera-se que a repotenciação gera impactos, havendo a necessidade de elaboração de novo EIA/RIMA, como quando se altera o nível do reservatório.

E – Elevado (5,0 , 7,5 , 10): considera-se que a repotenciação gera impactos de maior amplitude, como quando há alteração de área e de nível de reservatório, podendo implicar em desmatamento, interferência na fauna, aumento de processos erosivos, entre outros impactos relevantes, sendo possíveis de ocorrerem em casos de repotenciação do tipo reconstrução.

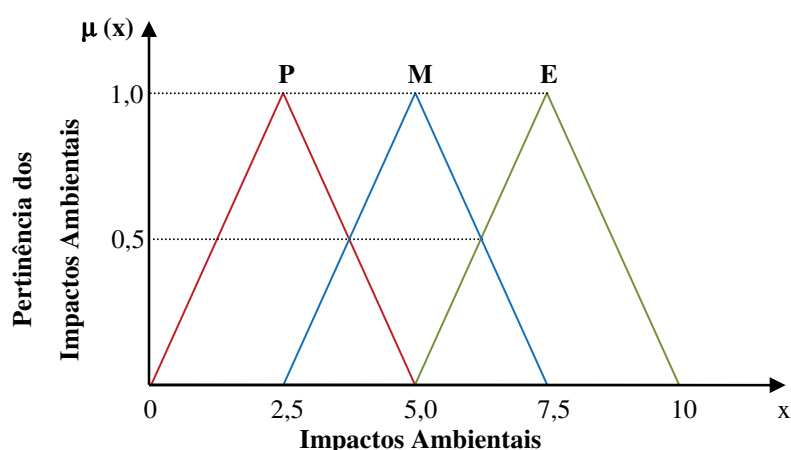


Figura 29 - Função de Pertinência: Impactos Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

Para o subcritério sócio-ambiental “Desenvolvimento Sócio-Econômico”, foi elaborada a função de pertinência apresentada na Figura 30, sendo:

P – Pouco (0 , 2,5 , 5,0): considerado como pouco desenvolvimento sócio-econômico decorrente da repotenciação, como em casos em que a usina já se encontrava em operação, o ganho de energia é pouco ou quando há pouca contribuição para a confiabilidade do sistema.

M – Médio (2,5 , 5,0 , 7,5): considerado se constatado que a repotenciação promove o desenvolvimento sócio-econômico, como, por exemplo, quando agrega mais energia e confiabilidade ao sistema elétrico, reativa uma usina que estava abandonada, gerando novos empregos à região e, inclusive, aumentando as arrecadações municipais.

E – Elevado (5,0 , 7,5 , 10): considerado como elevado desenvolvimento sócio-econômico promovido pela repotenciação, como em casos em que se eleva consideravelmente a oferta de energia, quando uma usina é reativada e além de gerar novos empregos, aquecer o comércio local, ainda se torna um local aberto à visitação de escolas do municípios, propício para o turismo ecológico, recreação, contribuindo para a formação educacional e para o bem estar da sociedade.

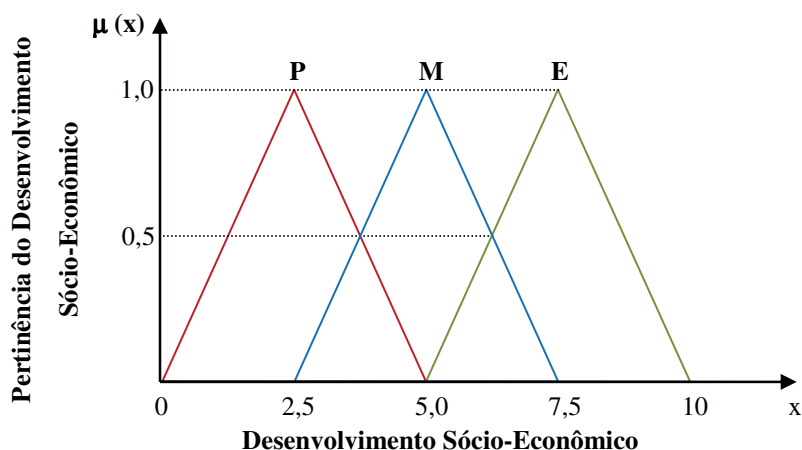


Figura 30 - Função de Pertinência: Desenvolvimento Sócio-Econômico (Fonte: Elaborado pelo autor).

Na tentativa de elevar o nível de confiabilidade dos resultados obtidos com a implementação da metodologia de decisão proposta neste trabalho, é importante que os julgamentos dos critérios sejam realizados por mais de um especialista e sempre considerando além de uma base de dados confiável e atual, também a experiência profissional e as características intrínsecas do problema em questão. Assim, o julgamento a ser considerado na tomada de decisão é obtido através da agregação dos julgamentos dos especialistas da área em estudo, sendo fundamental que o grau de coerência dos mesmos esteja dentro dos limites estabelecidos no método AHP, conforme apresentado no Capítulo 4.

5.4 Descrição método fuzzy-AHP

Depois de realizada uma avaliação prévia das condições em que se encontra a PCH, a etapa seguinte consiste em montar os cenários dos tipos de repotenciação que podem ser realizados na mesma, conforme a hierarquia do problema apresentada na Figura 24. Os cenários são formados por critérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais, compostos por subcritérios, conforme definido no item 5.2 deste capítulo. A determinação dos subcritérios quantitativos de cada tipo de repotenciação é realizada através de estudos específicos referentes a dados hidrológicos, características dos equipamentos eletromecânicos, do sistema de transmissão, metodologias de cálculo para análise de viabilidade econômica, levantamento de custos e tarifas, entre outros, demonstrados com mais detalhe no Capítulo 6. Os subcritérios qualitativos são determinados por especialistas, a partir das funções de pertinência *fuzzy* apresentadas no item 5.3 deste capítulo. Considerando a participação de mais de um especialista no processo de decisão, a agregação dos julgamentos é feita através do cálculo da média ponderada dos julgamentos dos subcritérios qualitativos, resultando em uma única função de pertinência *fuzzy* representativa. Para exemplificar, seja $\tilde{N}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ o julgamento do Especialista I e $\tilde{N}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ o julgamento do Especialista II para um mesmo subcritério. Considerando o mesmo peso para o julgamento de cada especialista, a média ponderada \tilde{N} das funções de pertinência triangulares \tilde{N}_1 e \tilde{N}_2 é obtida por (KAHRAMAN et al., 2009):

$$\tilde{N} = 0,5 \otimes \tilde{N}_1 \oplus 0,5 \otimes \tilde{N}_2 \quad (11)$$

$$\tilde{N} = (l, m, u)$$

$$l = 0,5 \times l_1 + 0,5 \times l_2$$

$$m = 0,5 \times m_1 + 0,5 \times m_2$$

$$u = 0,5 \times u_1 + 0,5 \times u_2$$

Tais funções de pertinência obtidas com a agregação dos julgamentos dos especialistas devem ser defuzzificadas através do método do centróide, aplicando a equação (10) apresentada no Capítulo 4, para encontrar os números reais representativos que irão compor, juntamente com os valores quantitativos, as matrizes dos subcritérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais (MEIXNER, 2009).

Depois de realizada a quantificação de todos os subcritérios para cada cenário de repotenciação, são elaboradas as matrizes de decisão dos mesmos, separadas por critério principal. Essa matriz, denominada matriz A , tem dimensão $m \times n$, sendo “ m ” o número de alternativas de repotenciação dispostas nas linhas e “ n ” o número de subcritérios dispostos nas colunas, conforme apresentado na Figura 13 do Capítulo 4, sendo para a hierarquia proposta neste trabalho: $m = 4$ para as alternativas de repotenciação, $n = 5$ para subcritérios técnicos, $n = 4$ para subcritérios econômicos e $n = 3$ para subcritérios sócio-ambientais. As colunas da matriz A devem ser normalizada, considerando se a contribuição de cada subcritério é direta ou inversa para a priorização das alternativas de repotenciação. Toma-se como exemplo:

- Contribuição direta: quanto maior o ganho de energia, maior a prioridade da alternativa.
- Contribuição inversa: quanto menor o tempo de indisponibilidade, maior a prioridade da alternativa.

Para detalhar o procedimento de normalização direta, supõe-se que a coluna 1 da matriz A refere-se a um subcritério que contribui diretamente para a priorização da alternativa de decisão. Primeiramente, determina-se a somatória dos elementos a_{i1} , conforme a equação (12):

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3n} \\ a_{41} & a_{42} & \dots & a_{4n} \end{bmatrix}$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^4 a_{i1} \quad (12)$$

A normalização direta da coluna 1 é feita dividindo cada elemento a_{i1} por S_1 , conforme segue:

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11}/S_1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21}/S_1 & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31}/S_1 & a_{32} & \dots & a_{3n} \\ a_{41}/S_1 & a_{42} & \dots & a_{4n} \end{bmatrix}$$

Para detalhar o procedimento de normalização inversa, supõe-se que a coluna 2 da matriz A refere-se a um subcritério que contribui inversamente para a priorização da alternativa de decisão. Neste caso, a normalização ocorre em duas etapas. Na primeira, determina-se a somatória dos elementos a_{i2} , conforme a equação (13):

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3n} \\ a_{41} & a_{42} & \dots & a_{4n} \end{bmatrix}$$

$$S' = \sum_{i=1}^4 a_{i2} \quad (13)$$

Então, deve-se dividir S' por cada elemento a_{i2} da matriz A , resultando em novos elementos definidos como b_{i2} , conforme apresentado a seguir:

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11} & S'/a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & S'/a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & S'/a_{32} & \dots & a_{3n} \\ a_{41} & S'/a_{42} & \dots & a_{4n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & b_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & b_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & b_{32} & \dots & a_{3n} \\ a_{41} & b_{42} & \dots & a_{4n} \end{bmatrix}$$

A segunda etapa consiste em determinar a somatória dos elementos b_{i2} , conforme a equação (14). A normalização da coluna 2 é concluída dividindo cada elemento b_{i2} por S_2 , conforme ilustrado:

$$S_2 = \sum_{i=1}^4 b_{i2} \quad (14)$$

$$A'' = \begin{bmatrix} a_{11} & b_{12}/S_2 & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & b_{22}/S_2 & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & b_{32}/S_2 & \dots & a_{3n} \\ a_{41} & b_{42}/S_2 & \dots & a_{4n} \end{bmatrix}$$

Determinada a matriz de decisão normalizada para cada subcritério, definida como matriz K , elaboram-se as matrizes de prioridade dos mesmos e dos critérios principais, a partir dos julgamentos par a par dos elementos feitos por especialistas, com base na função de pertinência apresentada na Figura 25. Havendo mais de um especialista, deve-se determinar a agregação dos julgamentos, conforme a equação (11). A matriz de prioridade dos critérios e subcritérios, também denominada matriz de comparação, é uma matriz quadrada recíproca positiva de ordem n , com valores unitários na diagonal principal e cujos elementos são funções de pertinência *fuzzy* triangulares, definida como:

$$\tilde{Z} = [\tilde{z}_{ij}]$$

$$\tilde{z}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$$

O formato geral da matriz \tilde{Z} é apresentado na Figura 31:

	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	...	CRITÉRIO n
CRITÉRIO 1	(1, 1, 1)	(l_{12}, m_{12}, u_{12})	...	(l_{1n}, m_{1n}, u_{1n})
CRITÉRIO 2	$(\frac{1}{u_{12}}, \frac{1}{m_{12}}, \frac{1}{l_{12}})$	(1, 1, 1)	...	(l_{2n}, m_{2n}, u_{2n})
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
CRITÉRIO n	$(\frac{1}{u_{1n}}, \frac{1}{m_{1n}}, \frac{1}{l_{1n}})$	$(\frac{1}{u_{2n}}, \frac{1}{m_{2n}}, \frac{1}{l_{2n}})$...	(1, 1, 1)

Figura 31 - Formato Geral da Matriz de Prioridade (Fuzzy-AHP) (Fonte: Elaborado pelo Autor).

Conforme o método AHP proposto por Saaty (1980), a próxima etapa é calcular a média geométrica de cada linha da matriz \tilde{Z} , determinando-se a prioridade local *fuzzy* dos critérios a partir do autovetor \tilde{r} , conforme apresentado na equação (15) (ALY; VRANA, 2008):

$$\tilde{r} = [\tilde{r}_i]$$

$$\tilde{r}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \tilde{z}_{ij}} \quad (15)$$

A equação (16) é utilizada para normalizar \tilde{r} , dando origem ao vetor \tilde{w} , o qual define a prioridade global *fuzzy* dos critérios (ALY; VRANA, 2008):

$$\tilde{w} = [\tilde{w}_i]$$

$$\tilde{w}_i = \left(\frac{l_i}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (16)$$

Por fim, os elementos do vetor \tilde{w} devem ser defuzzificados utilizando a equação (10) (método do centróide), e os valores reais representativos encontrados no vetor d devem ser submetidos ao processo de normalização direta, resultando no vetor de prioridade w . Para exemplificar, supondo um vetor \tilde{w} de dimensão 3×1 , tem-se:

$$\tilde{w} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 \\ \tilde{w}_2 \\ \tilde{w}_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \text{vetor de prioridade global fuzzy } \tilde{w}$$

$$\tilde{w}_1 = (l_1, m_1, u_1)$$

$$\tilde{w}_2 = (l_2, m_2, u_2)$$

$$\tilde{w}_3 = (l_3, m_3, u_3)$$

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \text{defuzzificação do vetor } \tilde{w}: \text{determinação do vetor } d$$

$$d_1 = \frac{l_1 + m_1 + u_1}{3}$$

$$d_2 = \frac{l_2 + m_2 + u_2}{3}$$

$$d_3 = \frac{l_3 + m_3 + u_3}{3}$$

$$S = \sum_{n=1}^3 d_i$$

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \text{normalização do vetor } d: \text{determinação do vetor } w$$

$$w_1 = d_1/S$$

$$w_2 = d_2/S$$

$$w_3 = d_3/S$$

De acordo com o método AHP, as matrizes de prioridade dos critérios, cuja ordem seja igual ou superior a 3, devem ser submetidas ao teste de consistência, sendo que o autovalor $\lambda_{m\acute{a}x}$ é calculado com os valores modais das funções de pertinência triangulares *fuzzy*, obtidos no vetor $\tilde{\lambda}$ com a aplicação do método original apresentado no Capítulo 4. A Razão de Consistência (*Consistency Ratio - RC*), ou simplesmente Consistência, da hierarquia deve ser inferior ou no máximo igual a 10%, caso contrário, os julgamentos devem ser reavaliados. O procedimento para realizar o teste de consistência é apresentado a seguir (SAATY, 1980):

- Determinar o vetor de totalização das entradas \tilde{t} , conforme equação (17):

$$\tilde{t} = \tilde{Z} \times \tilde{w} \quad (17)$$

- Calcular o vetor $\tilde{\lambda}$, de acordo com a equação (18):

$$\tilde{\lambda} = \frac{\tilde{t}}{\tilde{w}} \quad (18)$$

$$\tilde{\lambda} = [\tilde{\lambda}_i]$$

$$\tilde{\lambda}_i = (l'_i, m'_i, u'_i)$$

- Determinar $\lambda_{m\acute{a}x}$, a partir da equação (19), sendo n a ordem matriz de prioridade:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{\sum_{i=1}^n m'_i}{n} \quad (19)$$

- Calcular o Índice de Consistência (*Consistency Index - CI*), conforme equação (20):

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (20)$$

- A Razão de Consistência (*CR*) é obtida através da comparação do Índice de Consistência (*CI*) com o Índice Aleatório (*RI*), verificando se o resultado é menor ou igual a 0,10, conforme a equação (21). Os valores dos índices aleatórios estão apresentados na Tabela 2 do Capítulo 4:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 \quad (21)$$

A determinação do *ranking* que define qual o melhor tipo de repotenciação a ser implementada na PCH ocorre em duas etapas. Primeiro, determina-se o vetor de *ranking* das alternativas por critério principal, denominado u , fazendo a multiplicação das matrizes de decisão (K) dos subcritérios pelos respectivos vetores de prioridade w , conforme a equação (22):

$$\mathbf{u}_{(m \times 1)} = \mathbf{K}_{(m \times n)} \times \mathbf{w}_{(n \times 1)} \quad (22)$$

De acordo com a hierarquia proposta neste trabalho, como são 3 critérios principais: técnico (T), econômico (E) e sócio-ambiental (SA), a primeira etapa gera 3 vetores de *ranking*: u_T , u_E e u_{SA} , onde cada um deles, nesta mesma ordem, representa uma coluna da matriz de decisão final, H , de dimensão fixa 4×3 , pelo fato de se tratar de um problema de 4 alternativas de repotenciação ($m=4$) e 3 critérios de decisão principais. A segunda e última etapa determina o *ranking* do melhor tipo de repotenciação para a PCH em questão, representado pelo vetor de decisão x , que é resultado da multiplicação da matriz H pelo vetor de prioridade w_{CP} , que defini o peso dos critérios principais (CP), de acordo com a equação (23):

$$\mathbf{x}_{(4 \times 1)} = \mathbf{H}_{(4 \times 3)} \times \mathbf{w}_{CP(3 \times 1)} \quad (23)$$

O tipo de repotenciação mais indicado para ser efetuado na PCH em estudo, a partir dos critérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais pré-estabelecidos, corresponde ao maior valor do vetor x , sendo que a ordenação das demais alternativas obedece à escala de grandeza dos demais elementos do vetor x .

6 ESTUDO DE CENÁRIOS: REPOTENCIAÇÃO DA PCH SODRÉ

Este capítulo demonstra a aplicação da metodologia *fuzzy*-AHP proposta no estudo de repotenciação da PCH Sodré, a partir de dois cenários de decisão distintos, sendo que o primeiro prioriza fortemente os aspectos econômicos, enquanto o segundo retrata uma situa o de crise energética. Para cada cenário de decisão estabelecido, a implementa o da metodologia retorna o tipo de repotencia o mais apropriado para ser realizado na PCH Sodré, de acordo com as características da usina e os julgamentos de prioridades dos especialistas em rela o aos critérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais considerados na tomada de decisão.

6.1 Características da PCH Sodré

Para verificar os resultados que podem ser obtidos com a metodologia proposta neste trabalho, foram criados cenários de repotencia o hipotéticos a partir do estudo de caso da PCH Sodré realizado por Gyori (2007). A PCH Sodré, ilustrada na Figura 32, localiza-se no município de Guaratinguetá/SP, no Bairro dos Pilões, cujo potencial hidráulico   proveniente do Rio Piagui, que pertence   Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.



Figura 32 - PCH Sodré (Fonte: DAMATO; PANUNZIO, 2005)²².

²² Todas as fotos da PCH Sodré presentes neste trabalho foram feitas em 2005 por Julio Carlos Damato e Paulo Armando Panunzio, Professores da UNESP/Guaratinguetá.

O reservatório da barragem tem capacidade de armazenamento de 4.500 m³. Da usina até a captação, são 123 metros de altura. A usina incorpora um vertedouro de fundo (comporta de 1,00 m x 0,80 m), e uma tomada d'água integrada a uma câmara de carga, que possui duas válvulas de controle: uma para regulagem adicional de vazão do reservatório e outra para controle do fluxo à tubulação adutora.

A tubulação adutora, do tipo forçada, é constituída por um conduto em aço, de 1.500 m de comprimento e diâmetro externo de 0,925 m (diâmetro interno variável de 0,912 m a 0,919 m). O conduto encontra-se com leves incrustações e deformações, vazamento em alguns pontos, rompido e achatado em um trecho que chega a 200 m de comprimento, devido a um golpe de aríete, como pode ser visto na Figura 33 (CSPE, 2004).



Figura 33 - Tubulação Adutora Danificada: PCH Sodré (Fonte: DAMATO; PANUNZIO, 2005).

A usina possui três unidades geradoras de 200 kW cada uma, conforme apresentado na Figura 34. O canal de fuga   constituído por duas saídas conjuntas e uma isolada, atendendo às descargas das três unidades.



Figura 34 - Casa de Máquinas: PCH Sodré (DAMATO; PANUNZIO, 2005).

A subestac o localiza-se ao lado da casa de força. A usina Sodré fornecia energia através de uma linha de 13,8 kV com a freq ncia de 60 Hz (CSPE, 2004).

A inaugura o aconteceu em 1912 e a Sodré foi desativada pela primeira vez em 1982. De 1986 a 1990, passou por reforma, voltando a funcionar de 1990 até 1992, quando ocorreu o rompimento da tubula o e a empresa proprietária da usina optou pela sua desativa o definitiva.

6.2 Avalia o técnica da PCH Sodré

Para que seja possível demonstrar a aplica o da metodologia de auxílio   decisão proposta neste trabalho, a análise técnica da PCH Sodré   composta por características reais e hipotéticas, por não se ter informaçoes suficientes de todos os parâmetros necessários. As hipóteses utilizadas são baseadas na teoria apresentada no Capítulo 3 e em outros estudos de repotencia o, como o realizado por Veiga (2001), Bermann et al. (2004) e Bermann (2008), a fim de tentar criar cenários que se aproximem o mais possível da realidade.

As características técnicas da PCH Sodré a serem consideradas neste estudo, antes da repotencia o são:

- Início de operação: 1912
- Potência instalada: 600 kW
- Fator de carga (Antes da desativação): 65%
- Rendimento total do grupo gerador: 75%
- Sistema de distribuição: SIN
- Situação atual: Desativada desde 1992

A avaliação técnica da usina retornou os seguintes resultados (GYORI, 2007):

- Vazão turbinada: um novo estudo hidrológico constatou que a máxima vazão regularizada no Rio Piagui é de 4,57m³/s, sendo a vazão assegurada de 1,01 m³/s;
- Circuito hidráulico: o conduto forçado encontra-se bastante danificado, sendo necessária a substituição de em um trecho de aproximadamente 200 m de comprimento. O canal de fuga é constituído por duas saídas conjuntas e uma isolada, atendendo às descargas das três unidades e as condições de manutenção não são boas.
- Grupo turbina/gerador: Encontra-se em bom estado de conservação, entretanto, apresenta perda de rendimento em relação ao projeto original.
- Sistema de transformação e transmissão: As condições de conservação da subestação e de seus equipamentos são boas.
- Situação de operação da PCH: desativada.

6.3 Cenários de repotenciação

A partir da avaliação técnica, foram elaborados os possíveis cenários de repotenciação quanto às variáveis quantitativas, apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 - Cenários de Repotenciação: Critérios Quantitativos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIOS QUANTITATIVOS	TIPO DE REPOTENCIAÇÃO			
	MÍNIMA	LEVE	PESADA	RECONSTRUÇÃO
Ganho de Eficiência (%)	10%	20%	25%	25%
Ganho de Energia (MWh)	3.547,80	4.020,84	7.450,38	31.930,20
Tempo de Indisponibilidade (meses)	4	6	9	18
Índice de Instalação (R\$/kW)	861,55	993,66	1.151,50	1.552,20
Índice Receita/Custo	3,08	3,03	2,76	2,16
Tempo de Retorno (anos)	4,11	4,13	4,61	6,37
Emissão de CO ₂ Evitada (tCO ₂ e)	1.098,04	1.244,45	2.305,89	9.882,40

Os estudos realizados por Veiga (2001) e Bermann et al. (2004) foram utilizados para embasar as considerações feitas na montagem dos cenários quanto ao subcritério técnico “Ganho de Eficiência”, por apresentarem avaliações de diversos casos de repotenciação de PCHs que se assemelham em alguns aspectos com o caso da repotenciação da usina Sodré. O ganho de eficiência refere-se   diferença entre o fator de carga após e antes de ser realizada a respectiva repotencia o.

Como a PCH Sodré encontra-se desativada, o subcritério técnico “Ganho de Energia” refere-se a toda energia capaz de ser gerada pela usina após a repotencia o a que for submetida. Para determinar a energia gerada, considera-se um período de indisponibilidade de 10% ao ano, o fator de carga e a potência instalada para cada cenário.

Para os cenários de repotencia o mínima e leve, considera-se a potência instalada de 600 kW, referente às 3 unidades geradoras de 200 kW instaladas desde a constru o da usina, apenas propondo a recupera o dos rendimentos das máquinas no caso da repotencia o mínima e, no caso da repotencia o leve, envolvendo reparos mais aprimorados na turbina para que esta possa operar na sua capacidade máxima, e a troca de isolamento do gerador para que o mesmo suporte o maior aquecimento na opera o. O fator de carga considerado para a repotencia o mínima e leve são 75% e 85%, respectivamente.

Para o cenário de repotencia o pesada, são utilizados os parâmetros do estudo de caso apresentado por Gyori (2007), em que uma nova avalia o hidrológica constatou uma vazão assegurada que possibilita aumentar a potência instalada para 1.050 kW, através da instala o de 3 novas unidades de gera o de 350 kW, sem a necessidade de alterar o volume do reservatório e considerando 90% o fator de carga para este caso.

O cenário de reconstru o também toma como base um fator de carga de 90% e o estudo hidrológico mencionado anteriormente, tendo sido verificada uma vazão regularizada que permite instalar novas unidades geradoras que totalizem 4.500 kW de potência. Entretanto, segundo Maldonado et al. (2005), para que isto seja possível   necessário aumentar em aproximadamente dez vezes o volume do reservatório. Normalmente, isto seria motivo suficiente para que este tipo de repotencia o fosse considerado inviável, mas como a inten o deste trabalho   avaliar a utilidade de uma metodologia de auxílio   decisão, esta op o torna-se válida para o que se propõe.

O “Tempo de Indisponibilidade” necessário para que sejam realizadas as obras de repotencia o considerados tem como referência o estudo “Análise de Processos de Repotencia o de PCHs”, apresentado na IV Conferência de PCH realizada em agosto de 2008 em São Paulo (BERMANN, 2008).

Para a determinação dos subcritérios econômicos e sócio-ambientais quantitativos de cada cenário, foi utilizada a metodologia de cálculo apresentada por Gyori (2007) para análise de viabilidade econômica da repotenciação da PCH Sodré, considerando os seguintes dados:

- Tarifa de comercialização da energia elétrica: R\$ 112,00/MWh²³, considerado como preço-teto do primeiro Leilão A-3 do ano de 2012.
- Tarifa de uso do sistema de distribuição: R\$ 2,43/kW²⁴, homologado pela ANEEL para a Bandeirante Energia S.A., que é a concessionária responsável pela distribuição da energia elétrica no município de Guaratinguetá, onde se localiza a PCH Sodré.
- Tarifa de comercialização de crédito de carbono: R\$ 20,00/tCO₂e²⁵.
- Custo de operação e manutenção: R\$ 2,86/MWh²⁶.
- Custo de projeto: 7% do Custo Total da Repotenciação.
- Custo da substituição do conduto forçado: R\$ 191.406,38, de acordo com a Conta .12.19.34.23.23 das Diretrizes da Eletrobrás para Estudos e Projetos de PCHs²⁷, que considera como custo de aquisição o valor de US\$ 2.500/tonelada de conduto forçado metálico (US\$ 1,00 = R\$ 2,00), adicionando ainda 15% de impostos, 5% de seguro e transporte e 10% de montagem e testes.
- Índice de perdas em linhas de transmissão: 2%.
- Taxa de juros: 12% a.a.
- Reserva de capital: 10% da receita anual com a comercialização da energia gerada. Para um tempo de amortização máximo de 5 anos, essa reserva é garantida para “Índice Receita/Custo” acima de 2,57.
- Fator de Emissão de CO₂e: 0,3095 tCO₂e/MWh²⁸.

²³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA (ABRAGEL). Setor de PCH tenta encontrar saídas para crise da fonte. Notícias do Setor, Canal Energia, Publicada em: 21 de mar. 2012. Disponível em: <<http://www.apmpe.com.br/zpublisher/materias/noticias-abragel.asp?id=19133>>. Acesso em: 18 mar. 2012.

²⁴ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Homologatória N° 1.072, De 5 de Outubro de 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh20101072.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2012.

²⁵ FOREXPROS. Crédito de Carbono CFD Futuros - DEC 12. Consulta realizada em Abril de 2012. Disponível em: <<http://www.apmpe.com.br/zpublisher/materias/noticias-abragel.asp?id=19133>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

²⁶ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Metodologia de Cálculo da Geração Própria. Nota Técnica n° 098/2011. Brasília: Superintendência de Regulação Econômica, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/040/documento/nota_tecnica_n%C2%BA_098_ge_racao_propria.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2012.

²⁷ ELETROBRÁS. Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. 2000. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/data/Pages/LUMIS4AB3DA57PTBRIE.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2012.

²⁸ MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil – Ano Base 2010. Brasília: MCTI. Disponível em: <<http://www.mcti.gov.br/index.php/content/view/327118.html#ancora>>. Acesso: 08 fev. 2012.

Os custos totais de cada tipo de repotenciação estão apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 - Custo Total dos Cenários de Repotenciação da PCH Sodré (Fonte: Elaborado pelo autor).

CUSTO TOTAL DA REPOTENCIAÇÃO (R\$)			
MÍNIMA	LEVE	PESADA	RECONSTRUÇÃO
516.932,65	596.195,01	1.209.075,10	6.984.878,02

Os valores de custo total da repotenciação encontrados estão de acordo com os custos apresentados por Veiga (2001) e Bermann et al. (2004) para estudos de caso de repotenciação que se assemelham com os cenários elaborados para a PCH Sodré.

Para a determina o da receita anual total da usina, os créditos de carbono estão sendo considerados apenas no caso da repotencia o tipo reconstru o, onde se tem um ganho de energia que gera aproximadamente 10.000 tCO₂e/ano e uma receita referente   comercializa o desses créditos que compensa o elevado custo de transa o para obter a certifica o junto ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Segundo Machado e Pedroso (2011), os créditos de carbono podem ser solicitados por um período único de 10 anos ou por um período de 7 anos, com possibilidade de renova o por mais dois períodos consecutivos de 7 anos cada, totalizando até 21 anos de obten o de créditos de carbono, situa o a qual está sendo considerada neste trabalho para que fosse viabilizada a incorpora o dos créditos na análise econômica da repotencia o tipo reconstru o.

Para a defini o dos cenários quanto aos cr terios qualitativos, foram utilizadas as fun es de pertinência apresentadas no Capítulo 5.

Os julgamentos foram realizados por dois Professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá/UNESP, tratados neste trabalho como Especialista I e Especialista II. A fim de agregar maior precisão aos resultados obtidos com a implementa o da metodologia, foram selecionados especialistas com experiência comprovada na área em estudo. Destaca-se que os julgamentos ocorreram em ocasiões distintas, de modo que um especialista não tomou conhecimento das decisões do outro. Ainda assim, verifica-se que foram poucas as discordâncias, sendo este um fator importante para não comprometer a confiabilidade dos resultados obtidos com a aplica o da metodologia de decisão.

O Quadro 4 e a Tabela 5 apresentam, respectivamente, os julgamentos e as fun es de pertinência para os subcr terios qualitativos, de acordo com cada especialista, para cada um dos cenários de repotencia o, estando destacadas as situa es de discordância:

Quadro 4 - Julgamentos: Subcritérios Qualitativos (Fonte: Elaborado pelo autor)

SUBCRITÉRIOS QUALITATIVOS	ESPECIALISTA	TIPO DE REPOTENCIAÇÃO			
		MÍNIMA	LEVE	PESADA	RECONSTRUÇÃO
Burocracia/Legalização	I	P	P	M	E
	II	P	P	M	E
Garantia de Disponibilidade	I	P	M	M	E
	II	P	P	M	E
Encargos Sócio-Ambientais	I	B	B	M	ME
	II	B	B	B	ME
Impactos Ambientais	I	P	P	P	E
	II	P	P	P	E
Desenvolvimento Sócio-Econômico	I	M	M	M	M
	II	M	M	M	M

Tabela 5 - Funções de Pertinência: Subcritérios Qualitativos (Especialistas) (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIOS QUALITATIVOS	ESPECIALISTA	TIPO DE REPOTENCIAÇÃO			
		MÍNIMA	LEVE	PESADA	RECONSTRUÇÃO
Burocracia/Legalização	I	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(5,0 , 7,5 , 10,0)
	II	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(5,0 , 7,5 , 10,0)
Garantia de Disponibilidade	I	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(5,0 , 7,5 , 10,0)
	II	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(5,0 , 7,5 , 10,0)
Encargos Sócio-Ambientais	I	(0,0 , 0,0 , 10,0)	(0,0 , 0,0 , 10,0)	(0,0 , 10,0 , 20,0)	(20,0 , 30,0 , 40,0)
	II	(0,0 , 0,0 , 10,0)	(0,0 , 0,0 , 10,0)	(0,0 , 0,0 , 10,0)	(20,0 , 30,0 , 40,0)
Impactos Ambientais	I	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(5,0 , 7,5 , 10,0)
	II	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(0,0 , 2,5 , 5,0)	(5,0 , 7,5 , 10,0)
Desenvolvimento Sócio-Econômico	I	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(2,5 , 5,0 , 7,5)
	II	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(2,5 , 5,0 , 7,5)	(2,5 , 5,0 , 7,5)

A demonstração de como ocorre o processo de agregação dos julgamentos é feita para o subcritério “Garantia de Disponibilidade” no cenário de repotenciação “Leve”, sendo esta uma das situações de discordância entre os julgamentos. De acordo com a equação (11) apresentada no Capítulo 5, sendo $\tilde{N}_1 = (2,5, 5,0, 7,5)$ o julgamento do Especialista I e $\tilde{N}_2 = (0, 2,5, 5,0)$ o julgamento do Especialista II para o subcritério “Garantia de Disponibilidade”, e tendo sido considerado o mesmo peso para o julgamento de cada especialista, a função de pertinência *fuzzy* triangular \tilde{N} referente à agregação das funções de pertinências \tilde{N}_1 e \tilde{N}_2 é obtida por:

$$\tilde{N} = 0,5 \otimes (2,5, 5,0, 7,5) \oplus 0,5 \otimes (0, 2,5, 5,0)$$

$$\tilde{N} = (l, m, u)$$

$$l = 0,5 \times 2,5 + 0,5 \times 0 = 1,25$$

$$m = 0,5 \times 5,0 + 0,5 \times 2,5 = 3,75$$

$$u = 0,5 \times 7,5 + 0,5 \times 5,0 = 6,25$$

$$\tilde{N} = (1,25, 3,75, 6,25)$$

Analogamente foram determinadas as demais funções de pertinência da agregação dos julgamentos da Tabela 5, estando as mesmas apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6 - Funções de Pertinência: Subcritérios Qualitativos (Agregação) (Fonte: Elaborado pelo autor)

SUBCRITÉRIOS QUALITATIVOS	TIPO DE REPOTENCIAÇÃO			
	MÍNIMA	LEVE	PESADA	RECONSTRUÇÃO
Burocracia/Legalização	(0,00 , 2,50 , 5,00)	(0,00 , 2,50 , 5,00)	(2,50 , 5,00 , 7,50)	(5,00 , 7,50 , 10,00)
Garantia de Disponibilidade	(0,00 , 2,50 , 5,00)	(1,25 , 3,75 , 6,25)	(2,50 , 5,00 , 7,50)	(5,00 , 7,50 , 10,00)
Encargos Sócio-Ambientais	(0,00 , 0,00 , 10,00)	(0,00 , 0,00 , 10,00)	(0,00 , 5,00 , 15,00)	(20,00 , 30,00 , 40,00)
Impactos Ambientais	(0,00 , 2,50 , 5,00)	(0,00 , 2,50 , 5,00)	(0,00 , 2,50 , 5,00)	(5,00 , 7,50 , 10,00)
Desenvolvimento Sócio-Econômico	(2,50 , 5,00 , 7,50)	(2,50 , 5,00 , 7,50)	(2,50 , 5,00 , 7,50)	(2,50 , 5,00 , 7,50)

6.4 Matriz de decisão

Para determinar a melhor alternativa de repotenciação a ser realizada na PCH Sodré, os subcritérios quantitativos e qualitativos devem ser devidamente normalizados, conforme a metodologia descrita no Capítulo 5.

Considerando os subcritérios quantitativos, a maior prioriza o das alternativas de decisão   obtida:

- Quanto maior o Ganho de Eficiência;
- Quanto maior o Ganho de Energia;
- Quanto menor o Tempo de Indisponibilidade;
- Quanto menor o  ndice de Instala o;
- Quanto maior o  ndice Receita/Custo;
- Quanto menor o Tempo de Retorno;
- Quanto maior a Emissão de CO₂ Evitada.

Observa-se que os subcritérios “Ganho de Eficiência”, “Ganho de Energia”, “ ndice Receita/Custo” e “Emissão de CO₂ Evitada”, contribuem diretamente para a prioriza o das alternativas, enquanto os subcritérios “Tempo de Indisponibilidade”, “ ndice de Instala o” e “Tempo de Retorno”, contribuem inversamente.

A demonstra o de como   feita a normaliza o direta, tomando-se como exemplo o subcritério “Ganho de Energia”,   apresentada na Tabela 7:

Tabela 7 - Normalização Direta: Ganho de Energia (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	Ganho de Energia		NORMALIZAÇÃO DIRETA	Ganho de Energia
	Não Normalizado			
MÍNIMA	3.547,80		3.547,80 / 46.949,22 =	0,076
LEVE	4.020,84		4.020,84 / 46.949,22 =	0,086
PESADA	7.450,38		7.450,38 / 46.949,22 =	0,159
RECONSTRUÇÃO	31.930,20		31.930,20 / 46.949,22 =	0,680
TOTAL	46.949,22			1,000

A Tabela 8 apresenta a demonstração do processo de normalização inversa do subcritério “Tempo de Indisponibilidade”:

Tabela 8 - Normalização Inversa: Tempo de Indisponibilidade (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	Tempo de Indisponibilidade		NORMALIZAÇÃO INVERSA	Tempo de Indisponibilidade	
	Não Normalizado				Normalizado
MÍNIMA	4	37 / 4 =	9,250	9,250 / 21,583 =	0,429
LEVE	6	37 / 6 =	6,167	6,167 / 21,583 =	0,286
PESADA	9	37 / 9 =	4,111	4,111 / 21,583 =	0,190
RECONSTRUÇÃO	18	37 / 18 =	2,056	2,056 / 21,583 =	0,095
TOTAL	37		21,583		1,000

A Tabela 9 apresenta os valores dos demais subcritérios devidamente normalizados:

Tabela 9 - Subcritérios Quantitativos Normalizados (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIOS QUANTITATIVOS	TIPO DE REPOTENCIAÇÃO			
	MÍNIMA	LEVE	PESADA	RECONSTRUÇÃO
Ganho de Eficiência	0,125	0,250	0,313	0,313
Ganho de Energia	0,076	0,086	0,159	0,680
Tempo de Indisponibilidade	0,429	0,286	0,190	0,095
Índice de Instalação	0,315	0,273	0,236	0,175
Índice Receita/Custo	0,279	0,275	0,250	0,196
Tempo de Retorno	0,283	0,282	0,252	0,183
Emissão de CO ₂ Evitada	0,076	0,086	0,159	0,680

As funções de pertinência dos subcritérios qualitativos devem ser defuzzificadas pelo método do centróide, conforme a equação (10) apresentada no Capítulo 4, antes de serem normalizadas.

Para a normalização dos valores defuzzificados dos julgamentos, são consideradas as seguintes questões que resultam na maior priorização das alternativas:

- Quanto menor a Burocracia/Legalização;
- Quanto maior a Garantia de Disponibilidade;
- Quanto menor os Encargos Sócio-Ambientais;
- Quanto menor os Impactos Ambientais;
- Quanto maior o Desenvolvimento Sócio-Econômico.

Verifica-se que os subcritérios “Garantia de Disponibilidade” e “Desenvolvimento Sócio-Econômico”, contribuem diretamente para a priorização das alternativas, enquanto os subcritérios “Burocracia/Legalização”, “Encargos Sócio-Ambientais” e “Impactos Ambientais”, contribuem inversamente.

A demonstração de como é feita a defuzzificação e a normalização direta do subcritério “Garantia de Disponibilidade” é apresentada na Tabela 10:

Tabela 10 - Defuzzificação e Normalização: Garantia de Disponibilidade (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	Garantia de Disponibilidade Função de Pertinência	DEFUZZIFICAÇÃO	Garantia de Disponibilidade Não Normalizado	NORMALIZAÇÃO DIRETA	Garantia de Disponibilidade Normalizado
MÍNIMA	(0 , 2,50 , 5,00)	$(0 + 2,50 + 5,00) / 3 =$	2,50	$2,50 / 18,75 =$	0,133
LEVE	(1,25 , 3,75 , 6,25)	$(1,25 + 3,75 + 6,25) / 3 =$	3,75	$3,75 / 18,75 =$	0,200
PESADA	(2,50 , 5,00 , 7,50)	$(2,50 + 5,00 + 7,50) / 3 =$	5,00	$5,00 / 18,75 =$	0,267
RECONSTRUÇÃO	(5,00 , 7,50 , 10,0)	$(5,00 + 7,50 + 10,0) / 3 =$	7,50	$7,50 / 18,75 =$	0,400
TOTAL			18,75		1,000

A defuzzificação e normalização inversa do subcritério “Encargos Sócio-Ambientais” são apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11 - Defuzzificação e Normalização: Encargos Sócio-Ambientais. (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	Encargos Sócio-Ambientais Função de Pertinência	DEFUZZIFICAÇÃO	Encargos Sócio-Ambientais Não Normalizado	NORMALIZAÇÃO INVERSA	Encargos Sócio-Ambientais Normalizado
MÍNIMA	(0 , 0 , 10)	$(0 + 0 + 10) / 3 =$	3,33	$43,33 / 3,33 =$	13,00
LEVE	(0 , 0 , 10)	$(0 + 0 + 10) / 3 =$	3,33	$43,33 / 3,33 =$	13,00
PESADA	(0 , 5 , 15)	$(0 + 5 + 15) / 3 =$	6,67	$43,33 / 6,67 =$	6,50
RECONSTRUÇÃO	(20 , 30 , 40)	$(20 + 30 + 40) / 3 =$	30,00	$43,33 / 30 =$	1,44
TOTAL			43,33	33,94	1,000

Os resultados da normalização dos demais subcritérios qualitativos estão apresentados na Tabela 12:

Tabela 12 - Subcritérios Qualitativos Normalizados (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIOS QUALITATIVOS	TIPO DE REPOTENCIAÇÃO			
	MÍNIMA	LEVE	PESADA	RECONSTRUÇÃO
Burocracia/Legalização	0,353	0,353	0,176	0,118
Garantia de Disponibilidade	0,133	0,200	0,267	0,400
Encargos Sócio-Ambientais	0,383	0,383	0,191	0,043
Impactos Ambientais	0,300	0,300	0,300	0,100
Desenvolvimento Sócio-Econômico	0,250	0,250	0,250	0,250

Fazendo um agrupamento dos subcritérios quantitativos e qualitativos normalizados por critério principal, tem-se a elaboração da Tabela 13 para subcritérios técnicos, da Tabela 14 para subcritérios econômicos e da Tabela 15 para subcritérios sócio-ambientais:

Tabela 13 - Subcritérios Técnicos Normalizados (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	SUBCRITÉRIOS TÉCNICOS				
	Ganho de Eficiência	Ganho de Energia	Tempo de Indisponibilidade	Burocracia/Legalização	Garantia de Disponibilidade
MÍNIMA	0,125	0,076	0,429	0,353	0,133
LEVE	0,250	0,086	0,286	0,353	0,200
PESADA	0,313	0,159	0,190	0,176	0,267
RECONSTRUÇÃO	0,313	0,680	0,095	0,118	0,400

Tabela 14 - Subcritérios Econômicos Normalizados (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	SUBCRITÉRIOS ECONÔMICOS			
	Índice de Instalação	Índice Receita/Custo	Tempo de Retorno	Encargos Sócio-Ambientais
MÍNIMA	0,315	0,279	0,283	0,383
LEVE	0,273	0,275	0,282	0,383
PESADA	0,236	0,250	0,252	0,191
RECONSTRUÇÃO	0,175	0,196	0,183	0,043

Tabela 15 - Subcritérios Sócio-Ambientais Normalizados (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	SUBCRITÉRIOS SÓCIO-AMBIENTAIS		
	Emissão de CO ₂ Evitada	Impactos Ambientais	Desenvolvimento Sócio-Econômico
MÍNIMA	0,076	0,300	0,250
LEVE	0,086	0,300	0,250
PESADA	0,159	0,300	0,250
RECONSTRUÇÃO	0,680	0,100	0,250

As matrizes de decisão dos subcritérios (K_T , K_E e K_{SA}) utilizadas para determinar o *ranking* de decisão, conforme apresentado no Capítulo 5, são elaboradas com os valores das Tabelas 13, 14 e 15, na mesma ordem em que estão dispostos.

6.5 Cenário de Decisão I

Com o propósito de realizar uma análise de sensibilidade para verificar a influência da prioridade dos critérios sobre o *ranking* que definirá o melhor tipo de repotenciação a ser implementado na PCH Sodré, este trabalho apresenta o estudo de dois cenários de decisão.

O primeiro, denominado Cenário de Decisão I, apresenta todos os passos para a defini o das matrizes de prioridades, para os testes de consistência, bem como para a determina o do *ranking* de decisão, sendo dispensável o detalhamento dos procedimentos para o Cenário de Decisão II subsequente.

O Cenário de Decisão I reflete a análise mais comumente praticada, onde o empreendedor prioriza os aspectos econômicos na tomada de decisão, sendo o foco principal a maximiza o de lucros e a redu o de custos.

6.5.1 Prioridade dos critérios

A matriz de prioridade *fuzzy* dos critérios e subcritérios são elaboradas a partir dos julgamentos dos especialistas, com base na fun o de pertinência da Figura 25, apresentada no Capítulo 5. Os Quadros 5 e 6 apresentam as matrizes dos julgamentos de prioridade dos critérios principais, segundo os Especialistas I e II, respectivamente, apenas para o par em que o subcritério da linha tem mais importância que o da coluna.

Quadro 5 - Matriz de Julgamentos I: Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA I	Técnico	Econômico	Sócio-Ambiental
Técnico	(1, 1, 1)		
Econômico	A	(1, 1, 1)	E
Sócio-Ambiental	S		(1, 1, 1)

Quadro 6 - Matriz de Julgamentos II: Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA II	Técnico	Econômico	Sócio-Ambiental
Técnico	(1, 1, 1)		
Econômico	E	(1, 1, 1)	E
Sócio-Ambiental	S		(1, 1, 1)

A Tabela 16 apresenta a matriz de prioridade *fuzzy* dos critérios principais, cujas fun es de pertinência são obtidas com a agrega o dos julgamentos apresentados nos Quadros 5 e 6, sendo os valores dos pares recíprocos determinados calculando o inverso

dessas funções. Para demonstrar como foram obtidos os valores da Tabela 16, toma-se como exemplo o julgamento entre o par de critérios “Econômico” e “Técnico”.

De acordo com a função de pertinência apresentada na Figura 25 do Capítulo 5, o Especialista I julga que o critério “Econômico” tem um grau de importância absoluto em relação ao critério “Técnico”, sendo este julgamento representado pela letra A, cuja função de pertinência é (2,5 , 3,0 , 3,5). Já o Especialista II julga que o critério “Econômico” tem um grau de importância elevado em relação ao critério “Técnico”, sendo este julgamento representado pela letra E, cuja função de pertinência é (2,0 , 2,5 , 3,0). A agregação dos julgamentos, conforme a equação (11) do Capítulo 5, resulta na função de pertinência (2,25 , 2,75 , 3,25) que deve ocupar a segunda linha da primeira coluna. O valor que deve constar na célula recíproca a esta, ou seja, na primeira linha da segunda coluna, é determinado conforme apresentado na Figura 31 do Capítulo 5, sendo este $\left(\frac{1}{3,25}, \frac{1}{2,75}, \frac{1}{2,25}\right)$ ou, calculadas as inversões, (0,308 , 0,364 , 0,444).

Tabela 16 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	Técnico	Econômico	Sócio-Ambiental
Técnico	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,308 , 0,364 , 0,444)	(0,667 , 1,000 , 2,000)
Econômico	(2,250 , 2,750 , 3,250)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(2,000 , 2,500 , 3,000)
Sócio-Ambiental	(0,500 , 1,000 , 1,500)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(1,000 , 1,000 , 1,000)

Todo esse processo se repete analogamente para os subcritérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais, conforme apresentado nos quadros e tabelas subsequentes:

Quadro 7 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA I	Ganho de Eficiência	Ganho de Energia	Tempo de Indisponibilidade	Burocracia/Legalização	Garantia de Disponibilidade
Ganho de Eficiência	(1, 1, 1)		B	S	B
Ganho de Energia	E	(1, 1, 1)	A	S	M
Tempo de Indisponibilidade			(1, 1, 1)		
Burocracia/Legalização			E	(1, 1, 1)	M
Garantia de Disponibilidade			M		(1, 1, 1)

Quadro 8 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA II	Ganho de Eficiência	Ganho de Energia	Tempo de Indisponibilidade	Burocracia/Legalização	Garantia de Disponibilidade
Ganho de Eficiência	(1, 1, 1)		M	B	S
Ganho de Energia	E	(1, 1, 1)	A	M	M
Tempo de Indisponibilidade			(1, 1, 1)		
Burocracia/Legalização			E	(1, 1, 1)	M
Garantia de Disponibilidade			E		(1, 1, 1)

Tabela 17 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	Ganho de Eficiência	Ganho de Energia	Tempo de Indisponibilidade	Burocracia/Legalização	Garantia de Disponibilidade
Ganho de Eficiência	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(1,250 , 1,750 , 2,250)	(0,750 , 1,250 , 1,750)	(0,750 , 1,250 , 1,750)
Ganho de Energia	(2,000 , 2,500 , 3,000)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(2,500 , 3,000 , 3,500)	(1,000 , 1,500 , 2,000)	(1,500 , 2,000 , 2,500)
Tempo de Indisponibilidade	(0,444 , 0,571 , 0,800)	(0,286 , 0,333 , 0,400)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(0,364 , 0,444 , 0,571)
Burocracia/Legalização	(0,571 , 0,800 , 1,333)	(0,500 , 0,667 , 1,000)	(2,000 , 2,500 , 3,000)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(1,500 , 2,000 , 2,500)
Garantia de Disponibilidade	(0,571 , 0,800 , 1,333)	(0,400 , 0,500 , 0,667)	(1,750 , 2,250 , 2,750)	(0,400 , 0,500 , 0,667)	(1,000 , 1,000 , 1,000)

Quadro 9 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA I	Índice de Instalação	Índice Receita/Custo	Tempo de Retorno	Encargos Sócio-Ambientais
Índice de Instalação	(1, 1, 1)			
Índice Receita/Custo	M	(1, 1, 1)		S
Tempo de Retorno	A	E	(1, 1, 1)	M
Encargos Sócio-Ambientais	M			(1, 1, 1)

Quadro 10 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA II	Índice de Instalação	Índice Receita/Custo	Tempo de Retorno	Encargos Sócio-Ambientais
Índice de Instalação	(1, 1, 1)			
Índice Receita/Custo	M	(1, 1, 1)		B
Tempo de Retorno	E	E	(1, 1, 1)	M
Encargos Sócio-Ambientais	M			(1, 1, 1)

Tabela 18 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO ECONÔMICO	Índice de Instalação	Índice Receita/Custo	Tempo de Retorno	Encargos Sócio-Ambientais
Índice de Instalação	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,400 , 0,500 , 0,667)	(0,308 , 0,364 , 0,444)	(0,400 , 0,500 , 0,667)
Índice Receita/Custo	(1,500 , 2,000 , 2,500)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(0,750 , 1,250 , 1,750)
Tempo de Retorno	(2,250 , 2,750 , 3,250)	(2,000 , 2,500 , 3,000)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(1,500 , 2,000 , 2,500)
Encargos Sócio-Ambientais	(1,500 , 2,000 , 2,500)	(0,571 , 0,800 , 1,333)	(0,400 , 0,500 , 0,667)	(1,000 , 1,000 , 1,000)

Quadro 11 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA I	Emissão de CO ₂ Evitada	Impactos Ambientais	Desenvolvimento Sócio-Econômico
Emissão de CO ₂ Evitada	(1, 1, 1)		
Impactos Ambientais	A	(1, 1, 1)	E
Desenvolvimento Sócio-Econômico	B		(1, 1, 1)

Quadro 12 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA II	Emissão de CO ₂ Evitada	Impactos Ambientais	Desenvolvimento Sócio-Econômico
Emissão de CO ₂ Evitada	(1, 1, 1)		
Impactos Ambientais	A	(1, 1, 1)	E
Desenvolvimento Sócio-Econômico	M		(1, 1, 1)

Tabela 19 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	Emissão de CO ₂ Evitada	Impactos Ambientais	Desenvolvimento Sócio-Econômico
Emissão de CO ₂ Evitada	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,286 , 0,333 , 0,400)	(0,444 , 0,571 , 0,800)
Impactos Ambientais	(2,500 , 3,000 , 3,500)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(2,000 , 2,500 , 3,000)
Desenvolvimento Sócio-Econômico	(1,250 , 1,750 , 2,250)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(1,000 , 1,000 , 1,000)

Para demonstrar os procedimentos para a determinação da prioridade dos critérios, toma-se novamente os critérios principais como exemplo. O primeiro passo é calcular o vetor \tilde{r} da matriz de prioridade *fuzzy*, conforme a equação (15) apresentada no Capítulo 5, sendo:

$$\tilde{r} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_1 \\ \tilde{r}_2 \\ \tilde{r}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_1, m_1, u_1) \\ (l_2, m_2, u_2) \\ (l_3, m_3, u_3) \end{bmatrix}$$

Sendo \tilde{r}_1 o vetor que representa a média geométrica da linha referente ao critério “Técnico” da Tabela 16, tem-se:

$$\tilde{r}_1 = \sqrt[3]{\prod_{j=1}^3 \tilde{z}_{1j}}$$

$$l_1 = \sqrt[3]{1,000 \times 0,308 \times 0,667} = 0,590$$

$$m_1 = \sqrt[3]{1,000 \times 0,364 \times 1,000} = 0,714$$

$$u_1 = \sqrt[3]{1,000 \times 0,444 \times 2,000} = 0,961$$

$$\tilde{r}_1 = (0,590, 0,714, 0,961)$$

A Tabela 20 apresenta os demais elementos do vetor \tilde{r} e a somatória dos mesmos, para os critérios principais:

Tabela 20 - Vetor \tilde{r} : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR \tilde{r}
Técnico	(0,590 , 0,714 , 0,961)
Econômico	(1,651 , 1,901 , 2,136)
Sócio-Ambiental	(0,550 , 0,737 , 0,909)
TOTAL	(2,791 , 3,352 , 4,006)

O vetor de prioridade *fuzzy* dos critérios \tilde{w} é obtido pela normalização de \tilde{r} , segundo a equação (16) apresentada no Capítulo 5. A demonstração de como foi obtida prioridade *fuzzy* para o critério “Técnico” é apresentada a seguir:

$$\tilde{w} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 \\ \tilde{w}_2 \\ \tilde{w}_3 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{w}_1 = \left(\frac{l_1}{\sum_{i=1}^3 u_i}, \frac{m_1}{\sum_{i=1}^3 m_i}, \frac{u_1}{\sum_{i=1}^3 l_i} \right)$$

$$\tilde{w}_1 = \left(\frac{0,590}{4,006}, \frac{0,714}{3,352}, \frac{0,961}{2,791} \right)$$

$$\tilde{w}_1 = (0,147, 0,213, 0,344)$$

Os demais elementos do vetor \tilde{w} são calculados da mesma forma e estão apresentados na Tabela 21:

Tabela 21 - Vetor \tilde{w} : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR \tilde{w}
Técnico	(0,147 , 0,213 , 0,344)
Econômico	(0,412 , 0,567 , 0,765)
Sócio-Ambiental	(0,137 , 0,220 , 0,326)

Analogamente foram determinados os vetores \tilde{r} e \tilde{w} para os subcritérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais, apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 22 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR \tilde{r}
Ganho de Eficiência	(0,748 , 1,018 , 1,281)
Ganho de Energia	(1,496 , 1,864 , 2,208)
Tempo de Indisponibilidade	(0,434 , 0,508 , 0,620)
Burocracia/Legalização	(0,970 , 1,217 , 1,585)
Garantia de Disponibilidade	(0,693 , 0,852 , 1,103)

Tabela 23 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR \tilde{w}
Ganho de Eficiência	(0,110 , 0,186 , 0,295)
Ganho de Energia	(0,220 , 0,341 , 0,509)
Tempo de Indisponibilidade	(0,064 , 0,093 , 0,143)
Burocracia/Legalização	(0,143 , 0,223 , 0,365)
Garantia de Disponibilidade	(0,102 , 0,156 , 0,254)

Tabela 24 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO ECONÔMICO	VETOR \tilde{r}
Índice de Instalação	(0,471 , 0,549 , 0,667)
Índice Receita/Custo	(0,783 , 1,000 , 1,216)
Tempo de Retorno	(1,612 , 1,926 , 2,222)
Encargos Sócio-Ambientais	(0,765 , 0,946 , 1,221)

Tabela 25 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO ECONÔMICO	VETOR \tilde{w}
Índice de Instalação	(0,088 , 0,124 , 0,184)
Índice Receita/Custo	(0,147 , 0,226 , 0,335)
Tempo de Retorno	(0,303 , 0,436 , 0,612)
Encargos Sócio-Ambientais	(0,144 , 0,214 , 0,336)

Tabela 26 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	VETOR \tilde{r}
Emissão de CO ₂ Evitada	(0,503 , 0,575 , 0,684)
Impactos Ambientais	(1,710 , 1,957 , 2,190)
Desenvolvimento Sócio-Econômico	(0,747 , 0,888 , 1,040)

Tabela 27 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	VETOR \tilde{w}
Emissão de CO ₂ Evitada	(0,128 , 0,168 , 0,231)
Impactos Ambientais	(0,437 , 0,572 , 0,740)
Desenvolvimento Sócio-Econômico	(0,191 , 0,260 , 0,351)

Os vetores \tilde{w} devem ser defuzzificados e normalizados, dando origem ao vetor w que representa a prioridade de cada subcritério e dos critérios principais. A Tabela 28 apresenta as etapas para a determinação da prioridade dos critérios principais:

Tabela 28 - Determinação do Vetor w : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR \tilde{w}	DEFUZZIFICAÇÃO	VETOR w	
			Não Normalizado	NORMALIZAÇÃO
Técnico	(0,147 , 0,213 , 0,344)	$(0,147 + 0,213 + 0,344) / 3$	0,235	$0,235 / 1,044 = 0,225$
Econômico	(0,412 , 0,567 , 0,765)	$(0,412 + 0,567 + 0,765) / 3$	0,582	$0,582 / 1,044 = 0,557$
Sócio-Ambiental	(0,137 , 0,220 , 0,326)	$(0,137 + 0,220 + 0,326) / 3$	0,228	$0,228 / 1,044 = 0,218$
TOTAL			1,044	1,000

Os vetores w que definem as prioridades dos critérios principais e dos subcritérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais estão apresentados na Tabelas 29, 30, 31 e 32, respectivamente:

Tabela 29 - Vetor w : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR w
Técnico	0,225
Econômico	0,557
Sócio-Ambiental	0,218

Tabela 30 - Vetor w : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR w
Ganho de Eficiência	0,185
Ganho de Energia	0,334
Tempo de Indisponibilidade	0,094
Burocracia/Legalização	0,228
Garantia de Disponibilidade	0,160

Tabela 31 - Vetor w : Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO ECONÔMICO	VETOR w
Índice de Instalação	0,126
Índice Receita/Custo	0,225
Tempo de Retorno	0,429
Encargos Sócio-Ambientais	0,220

Tabela 32 - Vetor w : Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	VETOR w
Emissão de CO ₂ Evitada	0,171
Impactos Ambientais	0,568
Desenvolvimento Sócio-Econômico	0,260

Pelos resultados de prioridade obtidos nas tabelas dos vetores w , verifica-se que o subcritério técnico de maior importância é o “Ganho de Energia”, o econômico é o “Tempo de Retorno” e o sócio-ambiental são os “Impactos Ambientais”, sendo que o “Critério Econômico” tem mais que o dobro de importância que os outros critérios principais, retratando o tipo mais tradicional de tomada de decisão sobre a viabilidade de qualquer que seja o empreendimento.

6.5.2 Análise de consistência

Conforme consta na metodologia apresentada no Capítulo 5, deve-se realizar o teste de consistência de todas as matrizes de prioridades *fuzzy*, já que a menor ordem das mesmas é 3. O procedimento se inicia com a determinação do vetor de totalização das entradas, a partir da equação (17) apresentada no Capítulo 5. Para demonstrar como se determina o vetor \tilde{t} , a seguir estão apresentados os cálculos para o critério ‘Técnico’ (\tilde{t}_1) da matriz de prioridade *fuzzy* dos critérios principais, a partir dos valores apresentados nas Tabelas 16 e 21:

$$\tilde{t} = \tilde{Z} \times \tilde{w}$$

$$\tilde{t} = \begin{bmatrix} \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_2 \\ \tilde{t}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_1, m_1, u_1) \\ (l_2, m_2, u_2) \\ (l_3, m_3, u_3) \end{bmatrix}$$

$$l_1 = 1,000 \times 0,147 + 0,308 \times 0,412 + 0,667 \times 0,137 = 0,366$$

$$m_1 = 1,000 \times 0,213 + 0,364 \times 0,567 + 1,000 \times 0,220 = 0,639$$

$$u_1 = 1,000 \times 0,344 + 0,444 \times 0,765 + 2,000 \times 0,326 = 1,336$$

$$\tilde{t}_1 = (0,366, 0,639, 1,336)$$

Os demais elementos de \tilde{t} para os critérios principais foram determinados da mesma forma e estão apresentados na Tabela 33:

Tabela 33 - Vetor \tilde{t} : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR \tilde{t}
Técnico	(0,366 , 0,639 , 1,336)
Econômico	(1,018 , 1,702 , 2,862)
Sócio-Ambiental	(0,348 , 0,660 , 1,225)

As Tabelas 34, 35 e 36 apresentam os vetores \tilde{t} para os subcritérios técnicos, econômicos e sócio-ambientais.

Tabela 34 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR \tilde{t}
Ganho de Eficiência	(0,447 , 0,960 , 1,954)
Ganho de Energia	(0,896 , 1,733 , 3,258)
Tempo de Indisponibilidade	(0,260 , 0,472 , 0,910)
Burocracia/Legalização	(0,596 , 1,145 , 2,330)
Garantia de Disponibilidade	(0,422 , 0,797 , 1,622)

Tabela 35 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO ECONÔMICO	VETOR \tilde{t}
Índice de Instalação	(0,298 , 0,503 , 0,903)
Índice Receita/Custo	(0,488 , 0,916 , 1,689)
Tempo de Retorno	(1,011 , 1,771 , 3,054)
Encargos Sócio-Ambientais	(0,481 , 0,861 , 1,650)

Tabela 36 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	VETOR \tilde{t}
Emissão de CO ₂ Evitada	(0,338 , 0,507 , 0,808)
Impactos Ambientais	(1,140 , 1,726 , 2,603)
Desenvolvimento Sócio-Econômico	(0,497 , 0,783 , 1,241)

A próxima etapa consiste em calcular o vetor $\tilde{\lambda}$, conforme a equação (18) apresentada no Capítulo 5, para cada grupo de subcritérios e para os critérios principais. Tomando ainda o critério “Técnico” dos critérios principais como exemplo, a seguir é demonstrado como são calculados os elementos de $\tilde{\lambda}$, a partir dos valores das Tabelas 21 e 33:

$$\tilde{\lambda} = \frac{\tilde{t}}{\tilde{w}}$$

$$\tilde{\lambda} = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_1 \\ \tilde{\lambda}_2 \\ \tilde{\lambda}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_1, m_1, u_1) \\ (l_2, m_2, u_2) \\ (l_3, m_3, u_3) \end{bmatrix}$$

$$l_1 = 0,366 \div 0,344 = 1,061$$

$$m_1 = 0,639 \div 0,213 = 3,001$$

$$u_1 = 1,336 \div 0,147 = 9,074$$

$$\tilde{\lambda}_1 = (1,061, 3,001, 9,074)$$

As Tabelas 37, 38, 39 e 40 apresentam os vetores $\tilde{\lambda}$ para os critérios principais e subcritérios técnicos, econômicos e sócio-econômicos, respectivamente:

Tabela 37 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR $\tilde{\lambda}$
Técnico	(1,061 , 3,001 , 9,074)
Econômico	(1,330 , 3,001 , 6,944)
Sócio-Ambiental	(1,070 , 3,001 , 8,918)

Tabela 38 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR $\tilde{\lambda}$
Ganho de Eficiência	(1,514 , 5,146 , 17,749)
Ganho de Energia	(1,761 , 5,077 , 14,800)
Tempo de Indisponibilidade	(1,824 , 5,071 , 14,249)
Burocracia/Legalização	(1,633 , 5,136 , 16,333)
Garantia de Disponibilidade	(1,661 , 5,104 , 15,907)

Tabela 39 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Econômicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO ECONÔMICO	VETOR $\tilde{\lambda}$
Índice de Instalação	(1,622 , 4,047 , 10,211)
Índice Receita/Custo	(1,458 , 4,051 , 11,492)
Tempo de Retorno	(1,652 , 4,065 , 10,092)
Encargos Sócio-Ambientais	(1,431 , 4,025 , 11,484)

Tabela 40 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Sócio-Ambientais (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	VETOR $\tilde{\lambda}$
Emissão de CO ₂ Evitada	(1,463 , 3,016 , 6,293)
Impactos Ambientais	(1,540 , 3,016 , 5,958)
Desenvolvimento Sócio-Econômico	(1,414 , 3,016 , 6,505)

O autovalor $\lambda_{m\acute{a}x}$ é calculado com os valores modais das funções de pertinência *fuzzy* triangulares, obtidos no vetor $\tilde{\lambda}$, conforme a equação (19) apresentada no Capítulo 5.

O Índice de Consistência (*CI*), calculado a partir da equação (20), deve ser dividido pelo Índice Aleatório (*RI*) da Tabela 2, de acordo com a equação (21) apresentada no Capítulo 5, para se obter a Razão de Consistência (*CR*) da matriz de prioridade. Para que os julgamentos sejam válidos, *CR* deve ser no máximo igual a 10%.

A seguir são demonstrados os cálculos de $\lambda_{m\acute{a}x}$, *CI* e *CR* para a matriz de prioridade *fuzzy* dos critérios principais, cuja ordem é igual a 3, a partir dos dados das Tabelas 2 e 37:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{\sum_{i=1}^n m'_i}{n} = \frac{3,001 + 3,001 + 3,001}{3} = 3,001$$

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{3,001 - 3}{3 - 1} = 0,0005$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0005}{0,58} = 0,0009 < 0,10$$

A Tabela 41 apresenta os valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$, CI , RI e CR para as matrizes de prioridade *fuzzy* dos criterios principais e de cada grupo de subcriterio, sendo n a ordem de cada matriz:

Tabela 41 - Valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$, CI , RI e CR : Matrizes de Prioridade Fuzzy (Fonte: Elaborado pelo autor).

MATRIZ DE PRIORIDADE FUZZY	n	$\lambda_{m\acute{a}x}$	CI	RI	CR
Criterios Principais	3	3,001	0,0005	0,580	0,0009
Subcriterios Tecnicos	5	5,107	0,0267	1,120	0,0238
Subcriterios Economicos	4	4,047	0,0156	0,900	0,0174
Subcriterios Socio-Ambientais	3	3,016	0,0079	0,580	0,0137

Todos os valores de CR calculados sao menores que 10%, ficando comprovada a consistencia dos julgamentos.

6.5.3 Ranking de decisao

A primeira etapa para obter o *ranking* do tipo de repotenciaao que pode ser implementada na PCH Sodre e determinar o vetor de *ranking* das alternativas por subcriterio, fazendo a multiplicao da matriz dos subcriterios K pelo respectivo vetor de prioridade w :

- Subcriterio Tecnico:

$$\mathbf{u}_T = \begin{bmatrix} 0,125 & 0,076 & 0,429 & 0,353 & 0,133 \\ 0,250 & 0,086 & 0,286 & 0,353 & 0,200 \\ 0,313 & 0,159 & 0,190 & 0,176 & 0,267 \\ 0,313 & 0,680 & 0,095 & 0,118 & 0,400 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,185 \\ 0,334 \\ 0,094 \\ 0,228 \\ 0,160 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_T = \begin{bmatrix} 0,190 \\ 0,214 \\ 0,211 \\ 0,385 \end{bmatrix}$$

- Subcriterio Economico:

$$\mathbf{u}_E = \begin{bmatrix} 0,315 & 0,279 & 0,283 & 0,383 \\ 0,273 & 0,275 & 0,282 & 0,383 \\ 0,236 & 0,250 & 0,252 & 0,191 \\ 0,175 & 0,196 & 0,183 & 0,043 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,126 \\ 0,225 \\ 0,429 \\ 0,220 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_E = \begin{bmatrix} 0,308 \\ 0,301 \\ 0,236 \\ 0,154 \end{bmatrix}$$

- Subcritério Sócio-Ambiental:

$$\mathbf{u}_{SA} = \begin{bmatrix} 0,076 & 0,300 & 0,250 \\ 0,086 & 0,300 & 0,250 \\ 0,159 & 0,300 & 0,250 \\ 0,678 & 0,100 & 0,250 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,171 \\ 0,568 \\ 0,260 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_{SA} = \begin{bmatrix} 0,249 \\ 0,250 \\ 0,263 \\ 0,239 \end{bmatrix}$$

A Tabela 42 apresenta o *ranking* das alternativas de repotenciação da PCH Sodré para cada tipo de subcritério, sendo que os vetores u_T , u_E e u_{SA} , na ordem em que estão dispostos, devem compor a matriz H , de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 5.

Tabela 42 - Ranking por Subcritério (I): Repotencia o da PCH Sodré (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIA�O	SUBCRITÉRIO TÉCNICO		SUBCRITÉRIO ECONÔMICO		SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	
	VECTOR u_T	RANKING	VECTOR u_E	RANKING	VECTOR u_{SA}	RANKING
MÍNIMA	0,190	4 ^o	0,308	1 ^o	0,249	3 ^o
LEVE	0,214	2 ^o	0,301	2 ^o	0,250	2 ^o
PESADA	0,211	3 ^o	0,236	3 ^o	0,263	1 ^o
RECONSTRU�O	0,385	1 ^o	0,154	4 ^o	0,239	4 ^o

Observa-se que cada subcritério apresenta um tipo de repotencia o diferente ocupando a 1^a posi o do *ranking*. O tipo repotencia o “Leve”   a única alternativa que não ocupou a primeira coloca o, se mantendo na segunda posi o em todos os casos.

O *ranking* final que define qual   o tipo de repotencia o mais indicado para ser implementado na PCH Sodré, a partir das características técnicas, econ micas e sócio-ambiental do empreendimento e das prioridades dos critérios de decisão pré-estabelecidas,   obtido pela multiplica o da matriz H pelo vetor w , que define a prioridade dos critérios principais, conforme segue:

$$x = \begin{bmatrix} 0,190 & 0,308 & 0,249 \\ 0,214 & 0,301 & 0,250 \\ 0,211 & 0,236 & 0,263 \\ 0,385 & 0,154 & 0,238 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,225 \\ 0,557 \\ 0,218 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} 0,269 \\ 0,271 \\ 0,237 \\ 0,224 \end{bmatrix}$$

A Tabela 43 apresenta o *ranking* final, em porcentagem, do tipo de repotenciação a ser realizada na PCH Sodré:

Tabela 43 - Ranking Final (I): Repotenciação da PCH Sodré (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	CRITÉRIO PRINCIPAL	
	VETOR x (%)	RANKING
MÍNIMA	26,9%	2 ^o
LEVE	27,1%	1 ^o
PESADA	23,7%	3 ^o
RECONSTRUÇÃO	22,4%	4 ^o

O tipo de repotenciação “Leve” é o mais indicado para ser realizado na PCH Sodré, seguido da repotenciação “Mínima”, “Pesada” e “Reconstrução”, nesta ordem de prioridade. A proximidade observada entre a pontuação do primeiro e do segundo lugar no *ranking* pode ser resultado da semelhança de algumas características que favorecem a seleção desses dois tipos de repotenciação, como: a mesma potência instalada desde a construção da usina, não necessitando substituir as unidades de geração, menor burocracia, menores impactos; ou até mesmo ser um reflexo da ação combinada dos inúmeros julgamentos feitos pelos especialistas. As principais variáveis que diferem uma alternativa da outra são: o ganho de energia, os créditos de carbono gerados, o custo e o tempo da obra, sendo estes parâmetros maiores para a repotenciação leve.

É importante destacar que o *ranking* obtido com a aplicação da metodologia proposta neste trabalho é resultado de uma análise conjunta de todos os critérios envolvidos na tomada de decisão, característica de um MCDA, motivo pelo qual a opção selecionada para ser realizada na usina Sodré não é a de menor custo de repotenciação, mesmo que neste cenário tenha sido dada maior prioridade aos aspectos econômicos.

6.6 Cenário de Decisão II

O Cenário de Decisão II pretende refletir uma situação de crise energética, quando o suprimento emergencial da demanda, o aumento da oferta de energia, a redução de indisponibilidade, entre outros requisitos técnicos, passam a ter uma importância maior na tomada de decisão sobre a viabilidade dos empreendimentos.

Para simular esta situação, são elaboradas novas matrizes de prioridade *fuzzy* para os subcritérios técnicos e critérios principais, mantendo os mesmos julgamentos dos subcritérios econômicos e sócio-ambientais do Cenário de Decisão I na determinação do *ranking* de decisão.

6.6.1 Prioridade dos critérios

As matrizes de prioridade dos subcritérios econômicos e sócio-ambientais apresentadas no Cenário I não sofrem alteração, propondo novos julgamentos por parte dos especialistas apenas para os subcritérios técnicos e para os critérios principais.

Neste cenário de decisão, os julgamentos dos dois especialistas para os critérios principais não apresentaram nenhuma discordância, estando os mesmos apresentados no Quadro 13 e a respectiva matriz de prioridade *fuzzy*, na Tabela 44:

Quadro 13 - Matriz de Julgamentos I/II: Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA I/II	Técnico	Econômico	Sócio-Ambiental
Técnico	(1, 1, 1)		M
Econômico	S	(1, 1, 1)	E
Sócio-Ambiental			(1, 1, 1)

Tabela 44 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	Técnico	Econômico	Sócio-Ambiental
Técnico	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,667 , 1,000 , 2,000)	(1,500 , 2,000 , 2,500)
Econômico	(0,500 , 1,000 , 1,500)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(2,000 , 2,500 , 3,000)
Sócio-Ambiental	(0,400 , 0,500 , 0,667)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(1,000 , 1,000 , 1,000)

Os Quadros 14 e 15 apresentam os novos julgamentos dos especialistas para os subcritérios técnicos, sendo que a matriz de prioridade *fuzzy* obtida pela agregação dos referidos julgamentos está ilustradas na Tabela 45:

Quadro 14 - Matriz de Julgamentos I: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA I	Ganho de Eficiência	Ganho de Energia	Tempo de Indisponibilidade	Burocracia/Legalização	Garantia de Disponibilidade
Ganho de Eficiência	(1, 1, 1)		S	M	S
Ganho de Energia	E	(1, 1, 1)	M	E	M
Tempo de Indisponibilidade			(1, 1, 1)	M	
Burocracia/Legalização				(1, 1, 1)	
Garantia de Disponibilidade			S	M	(1, 1, 1)

Quadro 15 - Matriz de Julgamentos II: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

ESPECIALISTA II	Ganho de Eficiência	Ganho de Energia	Tempo de Indisponibilidade	Burocracia/Legalização	Garantia de Disponibilidade
Ganho de Eficiência	(1, 1, 1)		S	M	S
Ganho de Energia	E	(1, 1, 1)	E	E	E
Tempo de Indisponibilidade			(1, 1, 1)	M	
Burocracia/Legalização				(1, 1, 1)	
Garantia de Disponibilidade			S	M	(1, 1, 1)

Tabela 45 - Matriz de Prioridade Fuzzy: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	Ganho de Eficiência	Ganho de Energia	Tempo de Indisponibilidade	Burocracia/Legalização	Garantia de Disponibilidade
Ganho de Eficiência	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(0,500 , 1,000 , 1,500)	(1,500 , 2,000 , 2,500)	(0,500 , 1,000 , 1,500)
Ganho de Energia	(2,000 , 2,500 , 3,000)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(1,750 , 2,250 , 2,750)	(2,000 , 2,500 , 3,000)	(1,750 , 2,250 , 2,750)
Tempo de Indisponibilidade	(0,667 , 1,000 , 2,000)	(0,364 , 0,444 , 0,571)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(1,500 , 2,000 , 2,500)	(0,667 , 1,000 , 2,000)
Burocracia/Legalização	(0,400 , 0,500 , 0,667)	(0,333 , 0,400 , 0,500)	(0,400 , 0,500 , 0,667)	(1,000 , 1,000 , 1,000)	(0,400 , 0,500 , 0,667)
Garantia de Disponibilidade	(0,667 , 1,000 , 2,000)	(0,364 , 0,444 , 0,571)	(0,500 , 1,000 , 1,500)	(1,500 , 2,000 , 2,500)	(1,000 , 1,000 , 1,000)

Assim como no Cenário de Decisão I, foram determinados os vetores \tilde{r} e \tilde{w} para os critérios principais e subcritérios técnicos, apresentados nas tabelas subseqüentes:

Tabela 46 - Vetor \tilde{r} : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR \tilde{r}
Técnico	(1,000 , 1,260 , 1,710)
Econômico	(1,000 , 1,357 , 1,651)
Sócio-Ambiental	(0,511 , 0,585 , 0,693)

Tabela 47 - Vetor \tilde{w} : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR \tilde{w}
Técnico	(0,247 , 0,393 , 0,681)
Econômico	(0,247 , 0,424 , 0,658)
Sócio-Ambiental	(0,126 , 0,183 , 0,276)

Tabela 48 - Vetor \tilde{r} : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR \tilde{r}
Ganho de Eficiência	(0,660 , 0,956 , 1,230)
Ganho de Energia	(1,651 , 1,995 , 2,326)
Tempo de Indisponibilidade	(0,753 , 0,977 , 1,417)
Burocracia/Legalização	(0,463 , 0,549 , 0,683)
Garantia de Disponibilidade	(0,711 , 0,977 , 1,338)

Tabela 49 - Vetor \tilde{w} : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR \tilde{w}
Ganho de Eficiência	(0,094 , 0,175 , 0,290)
Ganho de Energia	(0,236 , 0,366 , 0,549)
Tempo de Indisponibilidade	(0,108 , 0,179 , 0,334)
Burocracia/Legalização	(0,066 , 0,101 , 0,161)
Garantia de Disponibilidade	(0,102 , 0,179 , 0,316)

As prioridades dos critérios principais e dos subcritérios técnicos obtidas pela defuzzificação e normalização dos valores da Tabela 47 e 49, estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 50 e 51:

Tabela 50 - Vetor w : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR w
Técnico	0,409
Econômico	0,411
Sócio-Ambiental	0,181

Tabela 51 - Vetor w : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR w
Ganho de Eficiência	0,172
Ganho de Energia	0,353
Tempo de Indisponibilidade	0,191
Burocracia/Legalização	0,101
Garantia de Disponibilidade	0,183

Observa-se que o “Ganho de Energia”, assim como no Cenário de Decisão I, tem a maior prioridade entre os subcritérios técnicos, ganhando ainda mais importância no Cenário de Decisão II. Entretanto, observa-se uma redução no peso da “Burocracia/Legalização” e uma valorização maior do “Tempo de Indisponibilidade” e da “Garantia de Disponibilidade”, já que o cenário caracteriza uma situação de crise energética. O critério “Técnico” e o critério “Econômico” têm praticamente a mesma prioridade, sendo que este último, por muito pouco, tem maior peso na tomada de decisão.

6.6.2 Análise de consistência

O vetor de totalização \tilde{t} e o vetor $\tilde{\lambda}$ dos critérios principais e dos subcritérios técnicos estão apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 52 - Vetor \tilde{t} : Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR \tilde{t}
Técnico	(0,600 , 1,183 , 2,686)
Econômico	(0,622 , 1,274 , 2,507)
Sócio-Ambiental	(0,307 , 0,549 , 1,059)

Tabela 53 - Vetor \tilde{t} : Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR \tilde{t}
Ganho de Eficiência	(0,377 , 0,881 , 1,942)
Ganho de Energia	(0,924 , 1,862 , 3,690)
Tempo de Indisponibilidade	(0,424 , 0,897 , 2,262)
Burocracia/Legalização	(0,266 , 0,514 , 1,062)
Garantia de Disponibilidade	(0,404 , 0,897 , 2,114)

Tabela 54 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Critérios Principais (Fonte: Elaborado pelo autor).

CRITÉRIO PRINCIPAL	VETOR $\tilde{\lambda}$
Técnico	(0,881 , 3,006 , 10,892)
Econômico	(0,946 , 3,006 , 10,166)
Sócio-Ambiental	(1,111 , 3,006 , 8,404)

Tabela 55 - Vetor $\tilde{\lambda}$: Subcritérios Técnicos (Fonte: Elaborado pelo autor).

SUBCRITÉRIO TÉCNICO	VETOR $\tilde{\lambda}$
Ganho de Eficiência	(1,299 , 5,026 , 20,588)
Ganho de Energia	(1,683 , 5,089 , 15,635)
Tempo de Indisponibilidade	(1,267 , 5,012 , 21,005)
Burocracia/Legalização	(1,654 , 5,102 , 16,037)
Garantia de Disponibilidade	(1,279 , 5,012 , 20,789)

A Tabela 56 apresenta os valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$, CI , RI e CR para as matrizes de prioridade *fuzzy*:

Tabela 56 - Valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$, CI , RI e CR : Matrizes de Prioridade Fuzzy (Fonte: Elaborado pelo autor).

MATRIZ DE PRIORIDADE FUZZY	n	$\lambda_{m\acute{a}x}$	CI	RI	CR
Critérios Principais	3	3,006	0,0028	0,580	0,0048
Subcritérios Técnicos	5	5,048	0,0120	1,120	0,0107
Subcritérios Econômicos	4	4,047	0,0156	0,900	0,0174
Subcritérios Sócio-Ambientais	3	3,016	0,0079	0,580	0,0137

O valor de CR é menor que 10% tanto para a matriz de prioridade *fuzzy* dos critérios principais, quanto para a dos subcritérios técnicos, comprovando a consistência dos julgamentos.

6.6.3 Ranking de decisão

Primeiramente, deve-se determinar o *ranking* para o subcritério técnico, já que o dos demais subcritérios já foram determinados no Cenário de Decisão I, conforme segue:

$$u_T = \begin{bmatrix} 0,125 & 0,076 & 0,429 & 0,353 & 0,133 \\ 0,250 & 0,086 & 0,286 & 0,353 & 0,200 \\ 0,313 & 0,159 & 0,190 & 0,176 & 0,267 \\ 0,313 & 0,680 & 0,095 & 0,118 & 0,400 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,172 \\ 0,353 \\ 0,191 \\ 0,101 \\ 0,183 \end{bmatrix}$$

$$u_T = \begin{bmatrix} 0,190 \\ 0,200 \\ 0,213 \\ 0,397 \end{bmatrix}$$

A Tabela 57 apresenta os vetores u_T , u_E e u_{SA} , que define o *ranking* do tipo de repotenciação para cada grupo de subcritérios, que devem compor a matriz de decisão H , na ordem em que estão dispostos:

Tabela 57 - Ranking por Subcritério (II): Repotenciação da PCH Sodré (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	SUBCRITÉRIO TÉCNICO		SUBCRITÉRIO ECONÔMICO		SUBCRITÉRIO SÓCIO-AMBIENTAL	
	VETOR u_T	RANKING	VETOR u_E	RANKING	VETOR u_{SA}	RANKING
MÍNIMA	0,190	4 ^o	0,308	1 ^o	0,249	3 ^o
LEVE	0,200	3 ^o	0,301	2 ^o	0,250	2 ^o
PESADA	0,213	2 ^o	0,236	3 ^o	0,263	1 ^o
RECONSTRUÇÃO	0,397	1 ^o	0,154	4 ^o	0,239	4 ^o

Observa-se houve uma inversão na colocação da repotenciação “Leve” e “Pesada”, em relação ao *ranking* obtido no Cenário de Decisão I, para o subcritério técnico.

O *ranking* final que define qual é o tipo de repotenciação mais indicado para a usina Sodré, é obtido pela multiplicação da matriz H pelo vetor w , que define a prioridade dos critérios principais, conforme apresentado a seguir:

$$x = \begin{bmatrix} 0,190 & 0,308 & 0,249 \\ 0,200 & 0,301 & 0,250 \\ 0,213 & 0,236 & 0,263 \\ 0,397 & 0,154 & 0,239 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,409 \\ 0,411 \\ 0,181 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} 0,249 \\ 0,251 \\ 0,232 \\ 0,269 \end{bmatrix}$$

A Tabela 58 apresenta o *ranking* final, em porcentagem, do tipo de repotenciação a ser realizada na PCH Sodré, para o Cenário de Decisão II:

Tabela 58 - Ranking Final (II): Repotenciação da PCH Sodré (Fonte: Elaborado pelo autor).

TIPO DE REPOTENCIAÇÃO	CRITÉRIO PRINCIPAL	
	VETOR x (%)	RANKING
MÍNIMA	24,9%	3 ^o
LEVE	25,1%	2 ^o
PESADA	23,2%	4 ^o
RECONSTRUÇÃO	26,9%	1 ^o

Mesmo sendo a alternativa de custo significativamente mais elevado, que demanda o maior tempo de indisponibilidade, a maior burocracia e que gera os impactos ambientais de maior amplitude, a “Reconstrução” da PCH Sodré resultará em um ganho de energia, de eficiência e de garantia de disponibilidade de energia ao sistema muito superior ao das demais alternativas, sendo que em uma situação de crise energética estas características são suficientes para justificar o resultado da decisão, ainda que a prioridade maior tenha sido dada aos critérios “Econômicos”.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho propõe a utilização inovadora da metodologia multicriterial *fuzzy*-AHP para auxiliar na determinação do tipo de repotenciação mais adequado para ser efetuado em PCHs desativadas ou que estejam operando abaixo de sua capacidade de geração. As alternativas de decisão contemplam desde a repotenciação mínima até a total reconstrução da usina, dependendo da prioridade atribuída aos diversos fatores técnicos, econômicos e sócio-ambientais a serem considerados caso a caso. O método se baseia no AHP convencional, utilizando a teoria de conjuntos *fuzzy* para tratar as variáveis lingüísticas do problema.

A validação da metodologia proposta é feita a partir do estudo de caso de repotenciação da PCH Sodré, localizada no município de Guaratinguetá e que se encontra desativada desde 1992. Sua proximidade em rela o ao ambiente de pesquisa, a disponibilidade de dados e a semelhança desta usina com diversas outras do país foram fatores determinantes para a escolha da mesma, sendo um dos propósitos deste trabalho que a metodologia de decisão apresentada possa ser reproduzida a outros estudos de repotencia o semelhantes no Brasil.

A partir da avalia o técnica da usina e da experiência de especialistas, foram criados diversos cenários com base nos parâmetros técnicos, econômicos e sócio-ambientais, associados a cada tipo de repotencia o possível de ser realizado na PCH Sodré. A metodologia foi implementada em dois cenários de decisão distintos, sendo que no Cenário I, o *ranking* gerado indicou a repotencia o “Leve” como sendo a mais apropriada para ser realizada na Sodré e no Cenário II, a selecionada foi a “Reconstru o”.

A contribui o da metodologia proposta fica evidente quando se analisa que, sem o auxílio da mesma, tomadores de decisão poderiam favorecer a repotencia o “Mínima” no Cenário I, por se tratar da op o de menor custo e menor tempo de indisponibilidade, já que   dada uma prioridade muito alta para os aspectos econômicos. Seguindo o mesmo raciocínio para o Cenário II, sendo o ganho de energia quase tão importante quanto o custo, a repotencia o “Pesada” poderia ter sido escolhida ao invés da “Reconstru o”, já que esta representaria um ganho energético de 75% em rela o   capacidade originalmente instalada na usina, com um custo de implanta o 6 vezes menor que o da “Reconstru o” e implicando menor tempo de indisponibilidade, burocracia, encargos e impactos ambientais.

Deve-se destacar que os *rankings* obtidos com a aplica o do método de decisão proposto derivam de uma análise mais bem estruturada, que considera a a o conjunta de todos os critérios envolvidos no processo, estando a confiabilidade dos resultados intimamente relacionada ao nível de conhecimento e experiência dos especialistas.

De fato, uma pequena mudança nos julgamentos da prioridade dos critérios pode ser suficiente para alterar a decisão. Por este motivo é que se decidiu por uma metodologia envolvendo os conjuntos *fuzzy*, a fim de melhor traduzir as incertezas inerentes ao raciocínio humano, além de enfatizar que os resultados se tornam mais confiáveis quanto maior for número de especialistas envolvidos no processo de decisão.

Alterações em custos de equipamentos, mão-de-obra, tributos, tarifas de comercialização de energia elétrica, condições de financiamento, fator de carga, mercado de carbono, entre outras, também podem influenciar significativamente no resultado da decisão, sendo essencial que as etapas de avaliação técnica, econômica e sócio-ambiental de cada cenário de repotenciação sejam realizadas com o maior rigor possível.

O problema de se decidir por um determinado tipo de repotenciação para uma PCH não é tarefa fácil, pelo fato de critérios relevantes se correlacionarem proporcionalmente, como por exemplo, a alternativa que gera o maior ganho de energia implica no maior custo. Então, a alternativa que é muito boa em um aspecto acaba sendo muito ruim em outro, mantendo a relação “vantagem/desvantagem” praticamente constante. Isso faz com que o ranking apresente valores muito aproximados, retratando uma elevada sensibilidade da decisão mediante as variações dos parâmetros que envolvem o processo. Portanto, a assertividade dos resultados depende muito do conhecimento dos especialistas e da precisão dos dados atribuídos aos critérios considerados na hierarquia do problema.

Dentre as diversas opções de métodos de decisão MCDA, diferentes versões do *fuzzy-AHP*, vários métodos de agregação, fuzzificação, defuzzificação existentes na literatura pesquisada, este trabalho primou por escolher praticidade aliada à precisão, para desenvolver uma metodologia que fosse realmente simples, útil e confiável.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se que seja realizado um levantamento das PCHs candidatas à repotenciação no Brasil e que, com o auxílio da metodologia apresentada neste trabalho, fosse determinada a real contribuição deste empreendimento para o suprimento da crescente demanda de energia elétrica no país nos próximos anos. Programas computacionais poderiam ser desenvolvidos para promover maior agilidade aos procedimentos e aumentar ainda mais a praticidade da utilização desta metodologia. Um aplicativo desses pode ser uma ferramenta bastante útil para estudos de planejamento energético, não apenas para repotenciação de PCHs, mas também de grandes hidrelétricas, sendo valorizada pela urgência em elevar a oferta de energia no país aliada à certeza de que as questões sócio-ambientais terão um peso cada vez maior nessas tomadas de decisão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução nº 394, de 4 dez. 1998**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res1998394.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução nº 652, de 9 dez. 2003**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução nº 482, de 17 abr. 2012**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 10 jun 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica nº 0043/2010-SRD**. ANEEL, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0043_GD_SRD.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica nº 026/2011-SRG**. ANEEL, 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/hotsite/arr/NT026.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de informações da geração; capacidade de geração do Brasil**. ANEEL, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

AGUILAR, G. de T. Avaliação de impacto social e proposição de medidas mitigadoras – Compromisso com a responsabilidade social. **CERPCH**, Artigos Técnicos – Meio Ambiente, maio de 2011. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/Adm/artigos/93413270923e589e01b32ee9e24d8f1d.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

ALVARENGA, M. I. N., Ferracioli, A., Melloni, R., Melloni, E. G. P. 2005. Entraves da legislação ambiental aplicada às pequenas centrais hidrelétricas no Brasil. **PCH Notícias e SHP News**, Itajubá: CERPCH, No. 28, jan-fev-mar 2006. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/1830138e83006a8ad6c34ae09d552976.pdf>> Acesso em: 10 jul. 2011.

ALVES, G.; YAMAGUSHI, H. R.; BRAUN, P. V. C. B. A exploração de PCHs no Brasil – A regulação e a prática. **PCH Notícias e SHP News**, Itajubá: CERPCH, No. 36, jan-fev-mar

2008. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/Adm/artigos/d8b990638896cc53e06c4f8d0f436d45.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

ALY, S.; VRANA I. Evaluating the knowledge, relevance and experience of expert decision makers utilizing the Fuzzy-AHP. **Agricultural Journals**, Agricultural Economics – CZECH, 54 (2008), N^o 11, p. 529-535.

BANCO MUNDIAL. **Licenciamento ambiental para empreendimentos hidrelétricos no Brasil: uma contribuição para o debate**. Escritório do Banco Mundial no Brasil, Vol. II: Relatório Principal, 2008. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/INTLACBRAZILINPOR/Resources/Relatorio_PRINCIPAL.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2012.

BELCHIOR, A. D.; XEXÉO, G. B.; ROCHA, A. R. C. da. **Enfoques sobre a teoria dos conjuntos fuzzy**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1997. Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=.%20enfoques%20sobre%20a%20teoria%20dos%20conjuntos%20fuzzy.&source=web&cd=1&sqi=2&ved=0CFEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwiki.xexeo.org%2Ftiki-download_file.php%3FfileId%3D69&ei=uSGpT7WSPNGK0QHI673jAw&usg=AFQjCNER9osyzxZa0rnzCErBnYa575u9Xw>. Acesso em: 10 mar. 2012.

BERMANN, C.; VEIGA, J. R. C. da; ROCHA, G. S. **A repotenciação de usinas hidrelétricas como alternativa para o aumento da oferta de energia no Brasil com proteção ambiental**. WWF-Brasil, 2004, 34 p. Disponível em: <<http://assets.panda.org/downloads/repotenciacaouheportugues.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2011.

BERMANN, C. **Análise de processos de repotenciação de PCHs**. In: CONFERÊNCIA DE PCH: MERCADO E MEIO AMBIENTE, IV, São Paulo: 2008. Disponível em: <http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/repotenciacao_de_pch.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2012.

BERMANN, C. **Repotenciação de usinas hidrelétricas: capacitação do IEE/USP com vistas à otimização energética do parque brasileiro**. In: WORKSHOP: REPOTENCIAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS. Brasília: ANEEL, 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/hotsite/arr/material.html>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

BIANCHI, I.; SOUZA, T. M. **Recapacitação e repotencialização de pequenas centrais hidrelétricas desativadas ou em operação no estado de São Paulo**. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS: ELECTRICITY, GENERATION AND TRANSMISSION, V, 2003, São Pedro. **Anais...** Guaratinguetá: José Luz Silveira, 2003. v.1. p. 20-25.

BORTONI, E. da C. **Repotenciação: bases teóricas, oportunidades e experiência internacional**. In: WORKSHOP: REPOTENCIAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS.

Brasília: ANEEL, 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/hotsite/arr/material.html>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

BOAS, C. de L. V. **Modelo multicritério de apoio à decisão aplicado ao uso múltiplo de reservatórios: estudo da barragem do Riberão João Leite**. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado em Economia – Gestão Econômica do Meio Ambiente) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/vilas_boas.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2012.

CARLSSON, C.; FULLÉR, R. Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments. **Fuzzy sets and systems**, Elsevier (1996), No. 78, p. 139-153.

CASTRO, R.; BURANI, G. F. **Repotenciação de usinas hidrelétricas**. In: Dossiê: Energia Positiva para o Brasil. Greenpeace, [2004]. Disponível em: <<http://www.ibcperu.org/doc/isis/5762.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2011.

CHANG, T-H., WANG T-C. Using the fuzzy multi-criteria decision making approach for measuring the possibility of successful knowledge management. **Information Sciences**, Elsevier (2009) No. 179, p. 355–370.

CHATZIMOURATIDIS, A. I., PILAVACHI, P. A. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. **Energy Policy**, Elsevier (2008), No. 36, p. 1074-1089.

CHATZIMOURATIDIS, A. I., PILAVACHI, P. A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. **Energy Policy**, Elsevier (2009), No. 37, p. 778-787.

COMISSÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA – CSPE. **Pequenas centrais hidrelétricas no estado de São Paulo**. 2. ed. São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 2004. 337p.

CONCEIÇÃO, A. L. Análise sócio-econômica e cultural das pequenas centrais hidrelétricas do estado de São Paulo. **Holos Environment**, Rio Claro: Centro de Estudos Ambientais – UNESP, Vol. 7, No. 1, Supl. 2, jun-dez 2007, p. 23-36. Disponível em: <<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/holos/issue/view/659>>. Acesso em: 12 dez. 2011.

CPFL GERAÇÃO. **Mecanismo de desenvolvimento limpo**. Meio Ambiente, Ações, Balanço de Carbono, mar. 2012. Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/geracao/MeioAmbiente/Accedilotildees/tabid/1412/Default.aspx>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

DARZÉ, A. S. S. P. **A questão ambiental como fator de desestímulo ao investimento no setor privado de geração de energia hidrelétrica no Brasil.** 2002, 135f. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração) – Escola de Administração da Universidade Federal da Bahia - EAUFBA, Salvador, 2002. Disponível em: <<http://www.adm.ufba.br/pub/publicacao/5/MPA/2002/174/darze2.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2011.

DE GOUVELLO, C.; COTO, O. **Transaction costs and carbon finance impact on smallscale CDM projects.** Washington: PCF Plus, PCF Plus Report 14, 2003.

ELETROBRÁS. Introdução. In: **___Diretrizes para projeto de PCH.** © Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras, 2000, p. 4-5. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/EM_Programas_PCH-COM/capitulos.asp>. Acesso em: 10 nov. 2011.

ELETROBRÁS. **Programas e linhas de financiamento – Proinfa.** 2007a. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com.br/elb/portal/main.asp?View={ABB61D26-1076-42AC-8C5F-64EB5476030E}>>. Acesso em: 01 mar 2012.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas.** PCH-COM, 2007b. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/downloads/EM_Programas_PCH-COM/anexo03_pch.zip>. Acesso em: 01 maio 2007.

ELETROBRÁS. **Potencial hidrelétrico brasileiro por estágio – Dezembro 2011.** Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/ELB/main.asp?View={21D128D3-361F-46D3-8145-2CF2B8035ED7}>>. Acesso em: 04 fev. 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030.** Apresentação do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2007, 40 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20070626_1.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica DEN 03/08:** Considerações sobre repotenciação e modernização de usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro: EPE, 2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081201_1.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Demanda de energia elétrica – 10 anos.** Informe à Imprensa. Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120104_3.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2012.

FERNANDES, J. E. de M. **Seleção de uma aeronave para atividades de charter regional: Uma abordagem multicritério baseada no método NAIADE.** 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Administração) – Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.ibmecrj.br/sub/RJ/files/dissert_mestrado/ADM_joaofernades_mai.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2012.

FILIPPIN, C. G.; LIRA, A. T. Análise estrutural de rotores de turbinas hidráulicas para estudo da incidência de trincas e desempenho à vida de fadiga. In: CONGRESSO de INOVAÇÃO TECNOLÓGICA em ENERGIA ELÉTRICA, I, 2001, Brasília. **Anais...** ANEEL, 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/Citenel2001/trabalhos/24.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

GALHARDO, C. (Ed.). Empreendedores traçam cenário para as PCHs. **PCH Notícias e SHP News**, Itajubá: CERPCH, No. 48, jan-fev-mar 2011. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/revistas/48/pag60e61.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2011.

GYORI, D. F. S. **Análise de viabilidade técnica-econômica de repotenciação de PCHs com inserção de benefícios ambientais: estudo de caso.** 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Conversão e Transmissão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/beg/33004080027P6/2007/gyori_dfs_me_guara.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2011.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN R. R.; TANSCHKEIT R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. Proc. In: INTERNATIONAL FUZZY SYSTEM ASSOCIATION WORLD CONGRESS, VI, 1995. São Paulo. **Proceeding...** IFSA, Congress-Tutorials, p. 1-38. Disponível em:< <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/gudwin/publications/ifsa95.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2012.

INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos. In: WORKSHOP BRASIL-JAPÃO EM ENERGIA, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 3., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas, Meio digital, 2005. p. 1-14. Disponível em: <<http://www.cori.rei.unicamp.br/BrasilJapao3/Trabalhos2005/Trabalhos%20Completo/Analise%20dos%20impactos%20ambientais%20na%20producao%20de%20energia%20den.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2007.

JORNAL MEIO AMBIENTE (JMA). **COP 17: Protocolo de Kyoto é renovado.** JMA, Clima, dez. 2011. Disponível em: <<http://jornalmeioambiente.com/materia/832/cop-17-protocolo-de-kyoto-e-renovado>>. Acesso em 10 fev. 2012.

KAHRAMAN, C.; KAYA, I.; CEBI, S. A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. **Energy**, Elsevier (2009), No. 34, p. 1603-1616.

LARRUBIA, C. B. **Método AHP como instrumento de apoio à decisão para a manutenção da qualidade da água do reservatório de Ilha Solteira**. 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais). Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2010.

LEILÃO A-3 e Leilão de Energia de Reserva de 2011. **Andrade&Canellas Energia S.A.**, Negócios, Leilões, 2011. Disponível em: <http://www.acenergia.com.br/imagens_materias/An%C3%A1lise%20P%C3%B3s-Leil%C3%A3o%20A-%20e%20Leil%C3%A3o%20de%20Reserva%202011%20Andrade&Canellas.pdf>. Acesso em 13 dez. 2011.

LENZI, C. (Ed.). Pequenas centrais hidrelétricas: uma história de sucesso que precisa continuar... **PCH Notícias e SHP News**, Itajubá: CERPCH, No. 51, out-nov-dez 2011. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/revistas/51/pch-shp-51-pag64e65.pdf>>. Acesso em 20 fev. 2012.

MACEDO, I. C. **Estado da arte e tendências tecnológicas para energia**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2003. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/fundos_setoriais/ct_energ/documentos/ct-energ03estado_arte.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2011.

MACHADO, F. W.; PEDROSO, A. (Ed.). Créditos de carbono: fonte de incentivo financeiro para a construção de PCHs. **PCH Notícias e SHP News**, Itajubá: CERPCH, No. 50, jul-ago-set 2011. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/pch-shp-50-pag53a58.pdf>>. Acesso em: 05. jan. 2011.

MALDONADO, O. A.; SILVEIRA, J. L.; PANUNZIO, P. A.; GYORI, D. F. S. Repowering small hydroelectric power plants: case study. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS: ELECTRICITY, GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Guaratinguetá, José Luz Silveira, 2005. v.1. p. 66-71.

MALDONADO, O. A.; SILVEIRA, J. L.; PANUNZIO, P. A.; GYORI, D. F. S. Technique-economical viability of repowering of small hydroelectric power plant considering the social and environmental insert. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 4., 2006, Palma de Mallorca. **Proceeding...** ICREPQ'06, 2006. v.1. p. 50-55. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/icrepq06/293-maldonado.pdf>>

MALDONADO, O. A.; BALESTIERI, J. A. P.; GYORI, D. F. S.; BARRETO FILHO, A. A. Análise de implantação de PCHs em municípios isolados no Brasil. In: LATIN-AMERICAN

CONGRESS: ELECTRICITY, GENERATION AND TRANSMISSION, IX, 2011, Mar del Plata, Argentina. **Anais...** Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, 2011.

MAMLOOK, R.; AKASH, B. A.; MOHSEN, M. S. A neuro-fuzzy program approach for evaluating electric power generation systems. **Energy**, Elsevier (2001), No. 26, p. 619-632.

MARTINS, A. V. B. **O uso da técnica dos grafos de ligação para a simulação de centrais hidrelétricas em regime transitório.** 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004. Disponível em: <<http://adm-net-a.unifei.edu.br/phl/pdf/0030593.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2011.

MEIXNER, O. Fuzzy ahp group decision analysis and its application for the evaluation of energy sources. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY/NETWORK PROCESS, X, 2009, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. **Proceedings...** Pittsburgh: Paper, 2009, 14 p., ISSN 1556-8296. Disponível em: <http://www.isahp.org/2009Proceedings/Final_Papers/50_Meixner_Fuzzy_AHP_REV_FIN.pdf>. Acesso em 20 mar. 2012.

MELO, M. N. **Mapeamento difuso no auxílio da redução dos impactos ambientais em uma usina hidrelétrica.** 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia – Planejamento e Gestão de Sistemas Energéticos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: <<http://adm-net-a.unifei.edu.br/phl/pdf/0034985.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Metodologia consolidada de linha de base para a geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis** – ACM0002/Versão 6. Convenção: Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC). Brasília: Conselho Executivos, 2006. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0027/27596.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2012.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Status atual das atividades de projeto no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) no Brasil e no mundo.** Brasília: MCTI, maio 2007. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0014/14996.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2012.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil – Ano Base 2010.** Brasília: MCTI, fev. 2012. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/327118.html#ancora>>. Acesso em 20 fev. 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas**. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Panorama energético brasileiro**. Revista *The Economist*, 2008. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/Artigos/Panorama_energxtico_brasileiro.pdf>. Acesso em 02 mar. 2012.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). A importância da repotenciação para o atendimento aos requisitos operativos do SIN. In: WORKSHOP: REPOTENCIAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS. Brasília: ANEEL, 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/hotsite/arr/material.html>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

POLITO, R. **Baixa de 285 MW no Proinfa**. Energia Hoje, Portal de Notícias: Editora Brasil Energia, 2012. Disponível em: <<http://www.energiahoje.com/online/eletrica/eolica-e-solar/2012/02/17/447083/baixa-de-285-mw-no-proinfa.html>>. Acesso em: 01 mar. 2012.

REIS, M. de M. **Custos ambientais associados à geração elétrica: hidrelétricas x termelétricas a gás natural**. 2001. 200f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/mmiranda.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2011.

REIS, T. V. M. **Emissões de gases de efeito estufa no Sistema Interligado Nacional - Metodologia para definição da linha de base e avaliação do potencial de redução da emissões do Proinfa**. 2002. 254f. Dissertação (Mestrado Profissional em Regulação da Indústria de Energia – Energia e Meio Ambiente) – Universidade de Salvador – UNIFACS, Salvador, 2002. Disponível em: <http://www.energia.unifacs.br/dissertacoes/tereza_mousinho.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2012.

RÖMER, C., KANDEL, A. Statistical tests for fuzzy data. **Fuzzy sets and systems**. Elsevier (1995). No. 72, p. 1-26.

ROY, B.; VANDERPOOTEN, D. The european school of MCDA: emergence, basic features and current works. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. 1, 1996, Vol. 5, pp. 22-38.

RUONING, X., XIAOYAN, Z. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment. **Fuzzy sets and systems**. Elsevier (1992). No. 52, p. 251-275.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T.L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Editora Makron Books, 1991.

SALOMON, V. A. P. **Desempenho da modelagem do auxílio à decisão por múltiplos critérios na análise do planejamento e controle da produção**. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: < <http://www.feg.unesp.br/~salomon/pesquisa/tese.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

SANTOS Jr, M. F. As Opções de comercialização da energia proveniente de PCHs pertencentes a empresas estatais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, VI, 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Artigo Científico, 2008, 23 p. Disponível em: < <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/8ae933cf6eb10c64e66cbcd56d91310.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

SANTOS, R. R. R. **Análise dos vínculos entre os certificados verdes e o mecanismo de desenvolvimento limpo** – A perspectiva de aplicação de certificados verdes no Brasil. 2005. 121f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/rrsantos.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

SOUSA, W. L. **Impacto ambiental de hidrelétricas**: uma análise comparativa de duas abordagens. 2000. 154f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/wlemgruber.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2011.

TIAGO FILHO, G. L. GALHARDO, C. R, NASCIMENTO, J. G. A do; FERRARI, J. T. Um panorama das pequenas centrais no Brasil. In: SIMPÓSIO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, V, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Artigo Científico, 2006a, 11 p. Disponível em: <http://www.artigocientifico.com.br/uploads/artc_1151321784_80.doc>. Acesso em: 21 nov. 2011.

TIAGO FILHO, G. L; NASCIMENTO, J. G. A do; FERRARI, J. T.; GALHARDO, C. R. A evolução histórica do conceito das pequenas centrais hidrelétricas no Brasil. In: SIMPÓSIO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, V, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Artigo Científico, 2006b, 11 p. Disponível em: Disponível em:<www.artigocientifico.uol.com.br/uploads/artc_1151321731_93.doc>. Acesso em: 12 dez. 2011.

TOVAR, A. C. de A. **O apoio do BNDES aos projetos de energia renovável**. São Paulo: 12º. Encontro Internacional de Energia, 2011. Disponível em:

<<http://www.fiesp.com.br/energia/pdf/tema6-painel2-antonio-andrada-tovar.pdf>>. Acesso em 15 jan. 2012.

TRIANANTAPHYLLOU, E.; LIN, C. T. Development and evaluation of five fuzzy multiattribute decision-making methods. **International Journal of Approximate Reasoning**, Elsevier (1996); No. 14, p. 281-310.

VEIGA, J. R. C da. **Oportunidade de negócios com a repotenciação de usinas**: aspectos técnicos, econômicos e ambientais. 2001. 119f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2002/Teses/Tese_Jose_Roberto.pdf> Acesso em: 26 abr. 2006.

VEIGA, J. R. C. da; BERMANN, C. Repotenciação de usinas hidrelétricas: uma avaliação a partir de três estudos de caso. **Revista Brasileira de Energia**. Itajubá: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2002, Vol. 9, No. 1, 9 p. Disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/rbe/revista/18/>>. Acesso em: 05 nov. 2011.

WANG, J.; JING, Y.; ZHANG, C.; ZHAO, J. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier (2009), No. 13, p. 2263–2278.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control** (1965), No. 8, p. 338-353.

ZANGENEH, A.; JADID, S.; RAHIMI-KIAN, A. A hierarchical decision making model for the prioritization of distributed generation technologies: A case study for Iran. **Energy Policy**, Elsevier (2009), No. 37, p. 5752–5763.

ZHOUP.; ANG B.W.; POH K.L. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. **Energy**, Elsevier (2006), No. 31, p. 2604–2622.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy set theory and its applications**. 2nd revised edition. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.