

METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS COM APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

Pâmella Santos Duarte,¹ Adriana Santos Corrêa Peixoto², Afonso Henriques Moreira Santos³ & Benedito Cláudio da Silva⁴

RESUMO - O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com participação de 43,8% das energias renováveis no total da energia consumida mundial. Analisando a Matriz Elétrica Brasileira, verifica-se que as fontes renováveis de energia correspondem a aproximadamente 73% desta produção, sendo aproximadamente 70%, referente ao grande potencial hidráulico. Com o incremento energético e os incentivos regulatórios ofertados pelo Governo Federal para a geração descentralizada de energia elétrica, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) tornaram-se atrativas aos investidores. Porém, a definição deste potencial não é uma tarefa simples e a dificuldade de localização e de obtenção da viabilidade técnica, ambiental e financeira destes aproveitamentos também é uma tarefa complexa. Neste sentido, esse artigo propõe uma nova metodologia, com base na Lógica Fuzzy, para análise preliminar da viabilidade técnica de potenciais hidrelétricos, determinando quão bom ou não é um aproveitamento, com base nas suas principais características físicas. Como estudo de caso, a metodologia foi aplicada no rio Caxixe, no estado do Espírito Santo. Os resultados obtidos mostram que a esta metodologia é eficaz e pode ser utilizado como ferramenta auxiliar na tomada de decisão com relação à viabilidade técnica dos aproveitamentos hidrelétricos.

ABSTRACT - Brazil possesses one of the cleaner energy matrices of the world, with participation of 43,8% of the energies renewed in the total of the consumed energy world-wide. Analyzing the Brazilian Electric Matrix, 70%, referring are verified approximately that the sources you renewed of energy approximately correspond 73% of this production, being to the great hydraulical potential. With the energy increment and the regulatory incentives offered by the Federal Government for the decentralized generation of electric energy, the PCH's had become attractive the investors. However, the definition of this potential is not a simple task and the difficulty of localization and attainment of the viability technique, ambient and financial of these exploitations also is a complex task. In this direction, this article considers a new methodology, on the basis of the Fuzzy Logic, for preliminary analysis of the viability technique of hidroelectric potentials, determining good or not an exploitation, on the basis of its main physical characteristics. As case study, the methodology was applied in the river Caxixe. The gotten results show that to methodology it's efficient and it can be used as tool auxiliary in the taking of decision with regard to the viability technique of the PCHS's.

Palavras-Chave: Viabilidade Técnica, PCH, Lógica Fuzzy.

¹ Msc. Eng^aHídrica – Ix Consultoria. R. Joaquim Francisco, 341 – Itajubá/MG. 37500-000. pamella.duarte@ixconsult.com.br

² Pesquisadora do EXCEN/UNIFEI. Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG. 37500-000. adriana.cerne@gmail.com

³ Professor da UNIFEI. Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG. 37500-000. afonsohms@gmail.com

⁴ Professor da UNIFEI. Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG. 37500-000. silvabenedito@gmail.com

1 - INTRODUÇÃO

Quando se está prospectando potenciais hidrelétricos ou, em uma etapa seguinte, realizando o inventário de uma bacia ou de um curso d'água, tem-se que avaliar, de maneira preliminar, a viabilidade técnica, econômica, ambiental e social dos possíveis aproveitamentos.

Entretanto, nessas etapas, o conhecimento específico dos sítios é ainda muito reduzido, e as possibilidades de arranjos são enormes. Tem-se que fazer uma seleção de forma a permitir o aprofundamento do conhecimento dos sítios hidro-energéticos, e, na seqüência dos estudos, como no desenvolvimento dos projetos básicos, desenvolver os cálculos estruturais, energéticos, etc., que conduzam a uma avaliação econômica consistente.

A avaliação preliminar baseia-se, sobretudo, na experiência do projetista, mas, mesmo esta, não é suficiente para uma seleção abrangente. Tem-se que estabelecer atributos que sejam capazes de serem avaliados, segundo alguma ótica. Poderia se aplicar, por exemplo, a teoria da ponderação, onde se dá pesos para os diferentes atributos.

Este artigo, no entanto, apresenta uma metodologia mais adequada ao tratamento das incertezas inerentes à tarefa descrita, seja pela dificuldade de se estabelecer os atributos e compô-los adequadamente, seja pela complexidade de qualificá-los. Busca-se trabalhar com variáveis qualitativas, ao invés de simplesmente quantitativas. O modelo, também, é adaptativo às evoluções do mercado, que são comuns no desenvolvimento das PCH's. A base matemática é a lógica difusa (Fuzzy Logic), que, combinada como uma base de dados significativa sobre PCH's, e uma análise de especialistas, conduz a um ferramental adequado à seleção de alternativas, no nível de prospecção ou inventário.

Enfocou-se apenas os aspectos técnico-econômicos, abstraindo-se dos sócio-ambientais, o que resulta, na verdade, em uma qualificação apenas técnica do aproveitamento. Com base em uma visão macro do arranjo, pode-se dividir em quatro sub-sistemas técnicos: casa de máquinas, sistema de adução, barragens e reservatórios. Esses incorporam os custos e dificuldades técnicas. De outra parte, o macro sistema "central hidrelétrica" tem um produto (potência) que é o seu benefício. Com base nesses cinco pontos é que se desenvolve a qualificação fuzzy e as respectivas análises.

2 - CONCEITOS BÁSICOS

Ao se analisar um aproveitamento hidrelétrico, tanto em sua fase de prospecção quanto nos estudos de inventário hidrelétrico, este pode ser caracterizado com base em características técnico-

econômicas e sócio-ambientais, podendo ser então classificado, em linhas gerais, em “bom, médio e ruim”. Porém, no âmbito deste artigo não serão abordadas caracterizações sócio-ambientais, levando em conta apenas, características técnicas e seus aspectos econômicos.

No que tange à caracterização técnico-econômica, esta é realizada analisando-se as características físicas do arranjo dos aproveitamentos hidrelétricos, tais como: queda bruta (HB), área inundada pelo reservatório (Ai), potência (P), comprimento e altura do barramento (volume construtivo), trecho de vazão reduzida (TVR).

Vale ressaltar a dificuldade de obtenção destas características físicas dos aproveitamentos nestas fases de estudos (prospecção e/ou inventário). Portanto, utilizam-se normalmente valores estimados, o que fortalece a posição de se usar metodologias menos convencionais como o emprego de Fuzzy Sets.

Para uma correta avaliação de um aproveitamento, deve-se definir atributos que sejam capazes de refletir os custos e benefícios dos principais componentes/sistemas, e suas dificuldades de implementação. No caso da avaliação técnico-econômica de centrais hidrelétricas, pode-se dizer que existem quatro grandes conjuntos a serem caracterizados: casa de máquinas, sistema de adução, barragens e reservatório. Estes incorporam os principais desafios e custos da central. De outra parte, a potência extraída desse sistema é o benefício principal da central. A Figura 1 ilustra o afirmado.

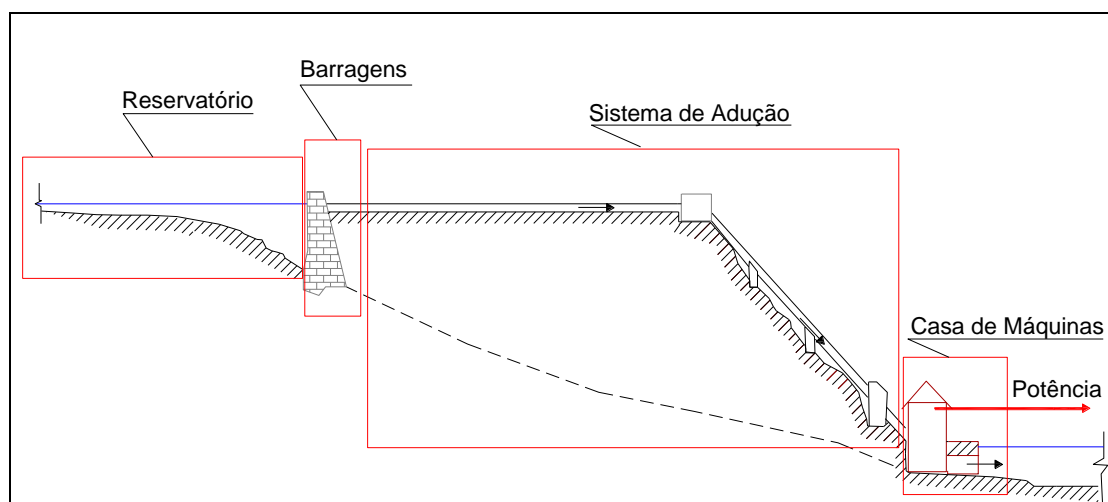


Figura 1: Componentes de um aproveitamento.

Para qualificar estes aproveitamentos foram criados atributos baseados nestas características físicas, sendo estes atributos aqui denominados Índices de Qualidade Técnica do Aproveitamento (IQT_{AP}). Estes índices serão, a seguir, apresentados.

3 - ÍNDICE DE QUALIDADE TÉCNICA DO APROVEITAMENTO

Os atributos das PCH's a serem qualificados são, de fato, índices de qualidade técnica, que serão definidos a seguir.

3.1 Índice de Qualidade Hidráulica (IQ_H)

Considere um potencial (H,Q) que deve ser aproveitado, hipoteticamente, por uma só turbina, de um mesmo tipo, com a mesma rotação.

Segundo Souza, Z.; et al. (1999), a rotação específica de turbinas define o tipo de rotor que melhor atende as características de vazão (Q) e queda (H). Ela é dada pela equação 1:

$$Nqa = \frac{1000 \cdot n \cdot Q^{1/2}}{(H \cdot g)^{3/4}} \quad (1)$$

Onde:

Nqa – rotação específica no Sistema Internacional [adimensional];

Q – vazão da turbina [m³/s];

H – altura de queda líquida [m];

n – rotação da turbina [rps].

A rotação específica também pode ser dada pela fórmula seguinte, utilizando potência ao invés de vazão:

$$Ns = \frac{1000 \cdot n \cdot P^{1/2}}{(H)^{5/4}} \quad (2)$$

Onde:

Ns – rotação específica em função de P e H;

P – potência da turbina [MW];

H – altura de queda líquida [m];

n – rotação da turbina [rps].

A rotação específica, além de definir o tipo de turbina, é também a principal variável explicativa do diâmetro do rotor da mesma. O diâmetro, por sua vez, define o peso da turbina e as

dimensões básicas da casa de máquinas. Quanto maior a rotação específica, maior o diâmetro do rotor. A Figura 2 mostra o comportamento do diâmetro de saída da turbina em função da rotação específica, assumindo potência e rotação constantes.

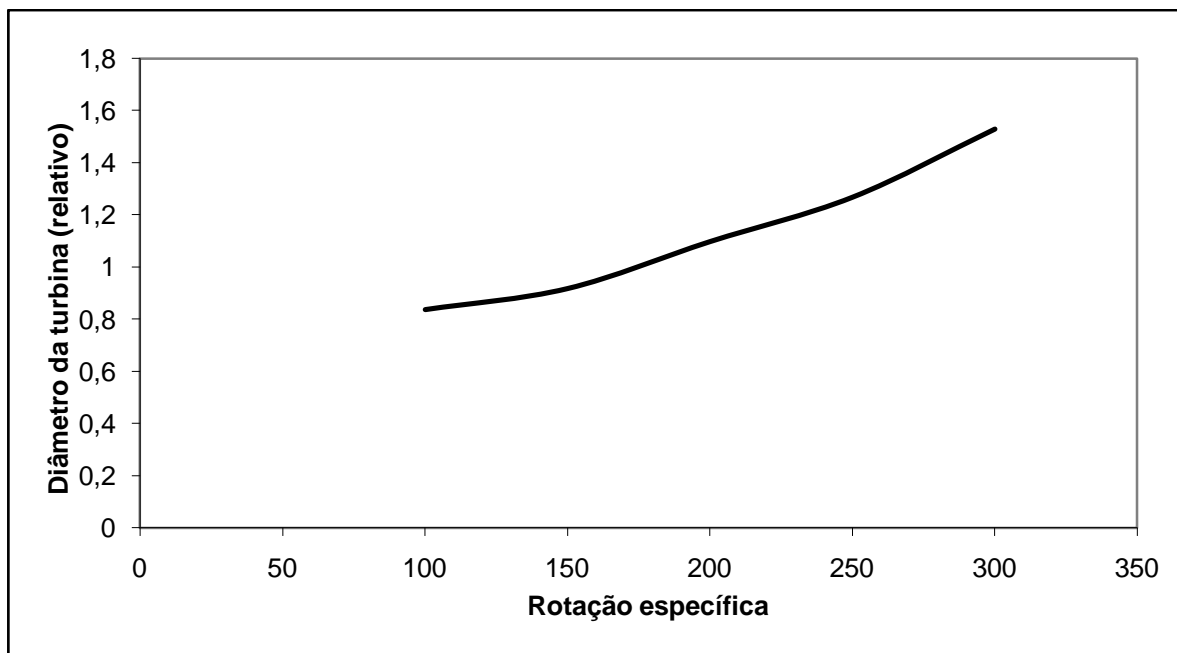


Figura 2: Rotação Específica x Diâmetro relativo da turbina.

Na Figura 3 estão representados, em função da queda H, os limites da rotação específica (N_{qA}) para os diferentes tipos de turbinas hidráulicas.

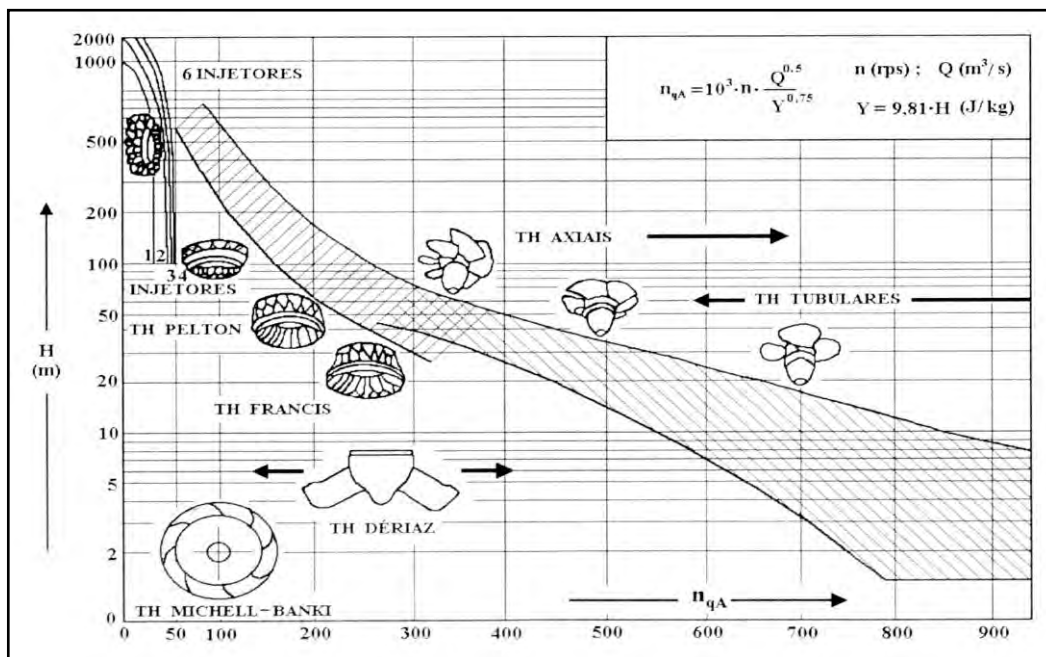


Figura 3: Campo de aplicação das turbinas hidráulicas.
Fonte: Souza, Z., et al (1999).

Com base no exposto anteriormente, pode-se definir índice de qualidade hidráulica (IQ_H) de um aproveitamento como sendo função do inverso da rotação específica, ou, de uma maneira mais simplificada, apenas da parte que relaciona vazão e queda ou potência e queda, como mostrado abaixo:

$$IQ_H = \frac{H^{3/4}}{Q^{1/2}} \quad (3)$$

Ou:

$$IQ_H = \frac{H^{5/4}}{P^{1/2}} \quad (4)$$

3.2 Índice de Qualidade de barragem (IQ_B)

Este índice considera todas as barragens na mesma forma de seção, com a mesma técnica construtiva (concreto), não considerando, portanto, o formato de vale. Este índice permite uma aproximação do volume do barramento, e, portanto, dá a idéia do volume de concreto a ser utilizado no empreendimento. Apenas o volume de concreto não é suficiente para qualificar um barramento. Entretanto, uma relação entre a potência da central e este volume, é capaz de fazê-lo, pois se têm, assim, uma avaliação relativa do custo do barramento. A equação 5 representa este índice.

$$IQ_B = \frac{P}{H_{BR}^2 * L} \quad (5)$$

Onde:

P – potência da turbina [MW];

H_{BR} – altura da barragem [m];

L – comprimento da crista da barragem [m].

3.3 Índice de Qualidade Captação-Restituição (IQ_{CR})

A distância entre os locais onde a água é captada e onde a mesma é restituída ao corpo d'água indica o custo do sistema de adução, seja ele por tubulação, túnel, canal ou pela combinação entre eles. De forma simplificada, o índice é obtido medindo-se a distância em linha reta entre o ponto de captação ao ponto de restituição da vazão desviada. Entretanto, não se pode qualificar o sistema de adução de uma central apenas por esta distância. Tem-se que tomar uma medida relativa à queda

bruta que se vai explorar, pois, é natural, que o aumento da queda bruta implicará no aumento desta distância. Assim, este índice é dado pela Equação 6, mostrada abaixo, com unidades convenientes:

$$IQ_{CR} = 100 * \frac{L_{CR}}{H_B} \quad (6)$$

Onde:

LCR – distância em linha reta entre a captação e a casa de máquinas [km];

HB – altura de queda bruta [m];

3.4 Índice de Qualidade do Desvio (IQ_D)

É semelhante ao índice de Qualidade da Captação-Restituição, porém este índice tem o enfoque que visa captar limitações ambientais e de uso da água, que podem implicar na redução da geração de energia, pelo aumento da vazão residual no TVR. Vale ressaltar a dificuldade referente à obtenção de dados para o trecho de vazão reduzida dos aproveitamentos, nesta etapa do trabalho.

$$IQ_D = 100 * \frac{L_{TVR}}{H_B} \quad (7)$$

Onde:

LTVR – comprimento do trecho de vazão reduzida [m].

3.5 Índice de Qualidade da Inundação (IQ_I)

Inicialmente, o limite máximo de área alagada referente a uma PCH era de 3 km². Entendia-se, então, que uma PCH de 10 MW com um reservatório de 3 km² podia ser dita boa, ou medianamente boa.

Com a expansão das PCH's para o Centro-Oeste, estas passaram a exigir maiores áreas alagadas e a regra de classificação de PCH's foi mudada para a inequação seguinte:

$$A_i \leq \frac{14,3 * P}{H_B} \quad (8)$$

Onde:

$$A \leq 13 \text{ km}^2$$

$$P \leq 30 \text{ MW}$$

Uma forma adequada de avaliar a inundação é através da potência específica produzida (potência dividido por área de inundação), que é o IQI. Este índice então pode ser obtido pela Equação 9 mostra logo abaixo.

$$IQ_I = \frac{P}{A_i} \quad (9)$$

Onde:

A_i – área alagada (km^2).

3.6 Índice de Qualidade de Potência (IQ_P)

Como já foi citada anteriormente, a potência é o principal produto de uma central. O desejado, tendo em vista a economicidade, é se ter PCH's com geração mais próxima possível de 30 MW. De outro lado, PCH's com potência inferior a 3 MW são de difícil viabilidade.

Tendo em vista a exigüidade dos potenciais, vislumbra-se hoje 10 MW como sendo um aproveitamento com potencial regular.

Este índice está diretamente ligado, então, à potência do aproveitamento. A Equação 10 mostra isso.

$$IQ_P = P \quad (10)$$

4 - MODELAGEM COM LÓGICA DIFUSA

Com base nas definições anteriores, em um conjunto significativo de dados de PCH's e na análise de especialistas, pode-se qualificar os atributos apresentados. Na seqüência, são apresentadas as funções de pertinência dos índices de qualidade (atributos), com comentários e apresentação de dados.

4.1 Funções de Pertinência

- Índice de Qualidade Hidráulica (IQ_H):

Com base na análise individual realizada por especialistas, constrói-se a curva de pertinência deste índice, mostrado na Figura 5.

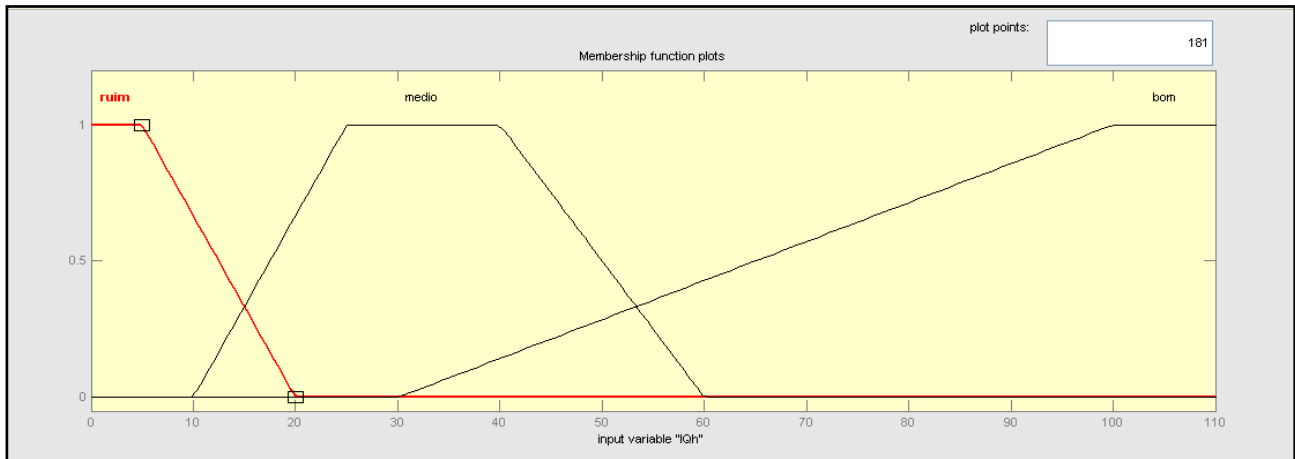


Figura 4: Curva de Pertinência de IQ_H

- Índice de Qualidade de Barragem (IQ_B):

Com base na análise individual realizada por especialistas, constrói-se a curva de pertinência deste índice, mostrado na Figura 7.

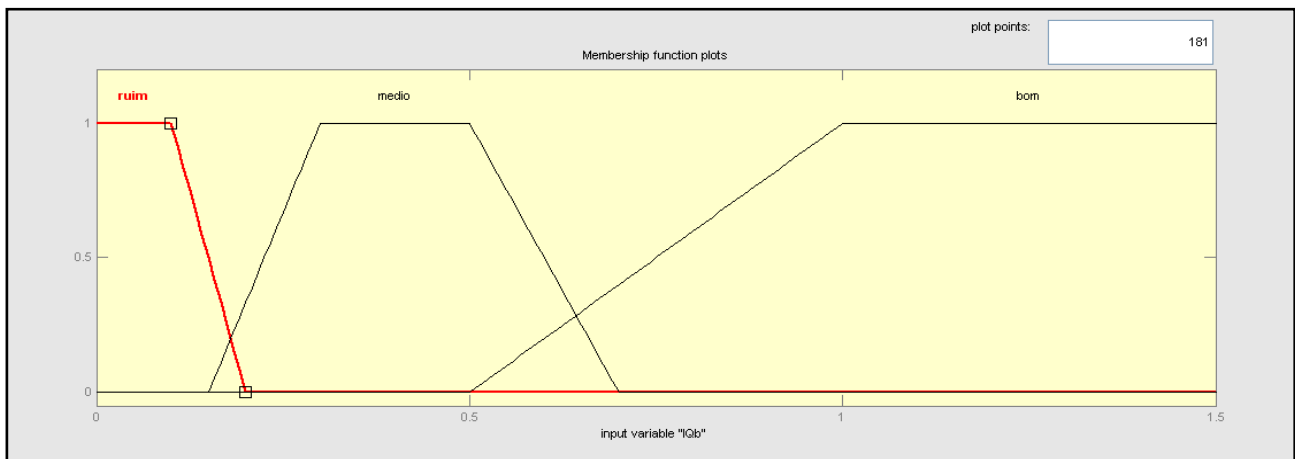


Figura 5: Curva de Permanência de IQ_B

- Índice de Qualidade da Captação-Restituição (IQ_{CR}):

Com base na análise individual realizada por especialistas, constrói-se a curva de pertinência deste índice, mostrado na Figura 9.

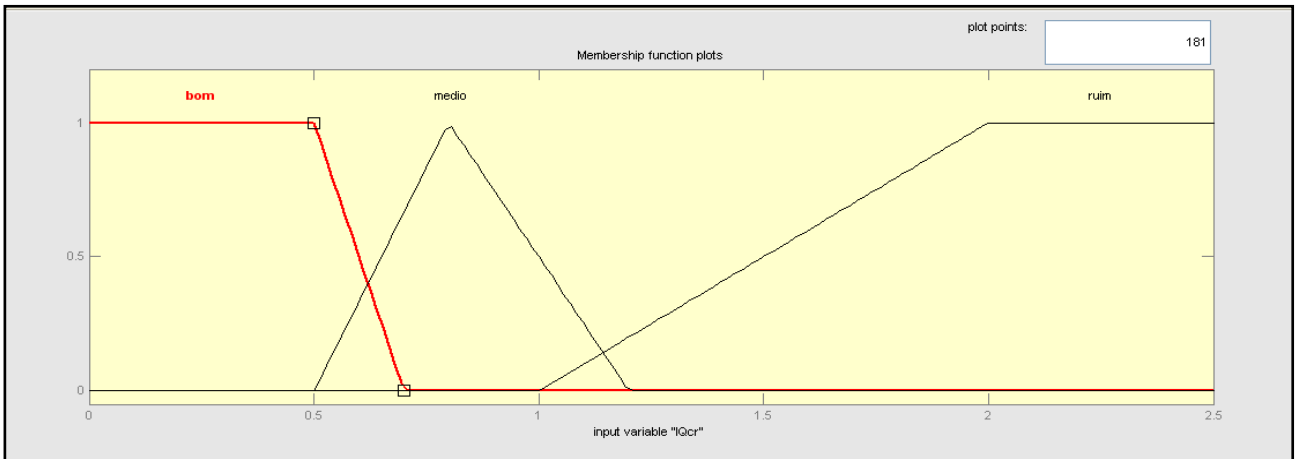


Figura 6: Curva de Permanência de IQ_{CR}

- Índice de Qualidade do Desvio (IQ_D):

Com base na análise individual realizada por especialistas, constrói-se a curva de pertinência deste índice, mostrado na Figura 11.

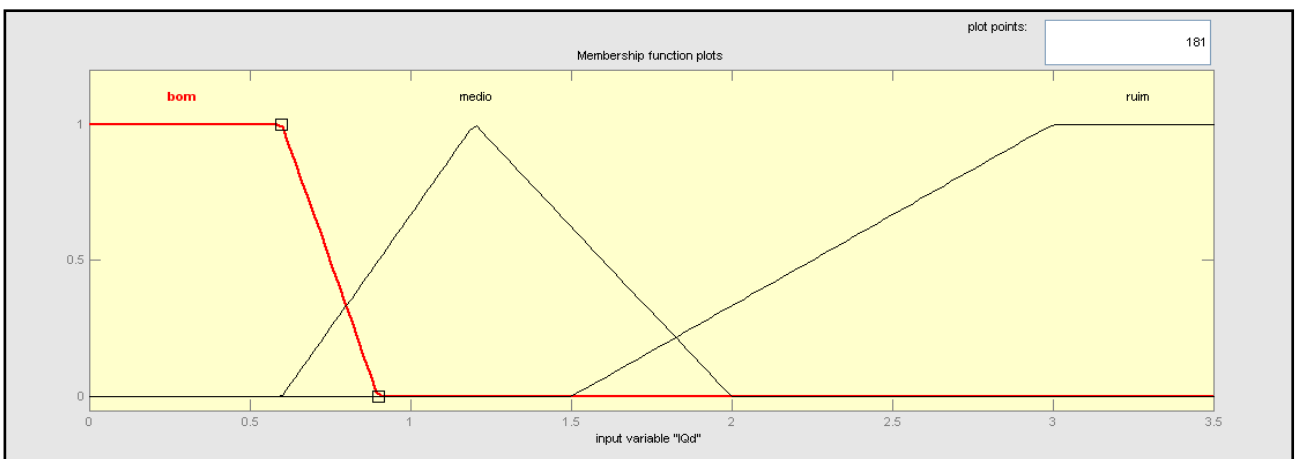
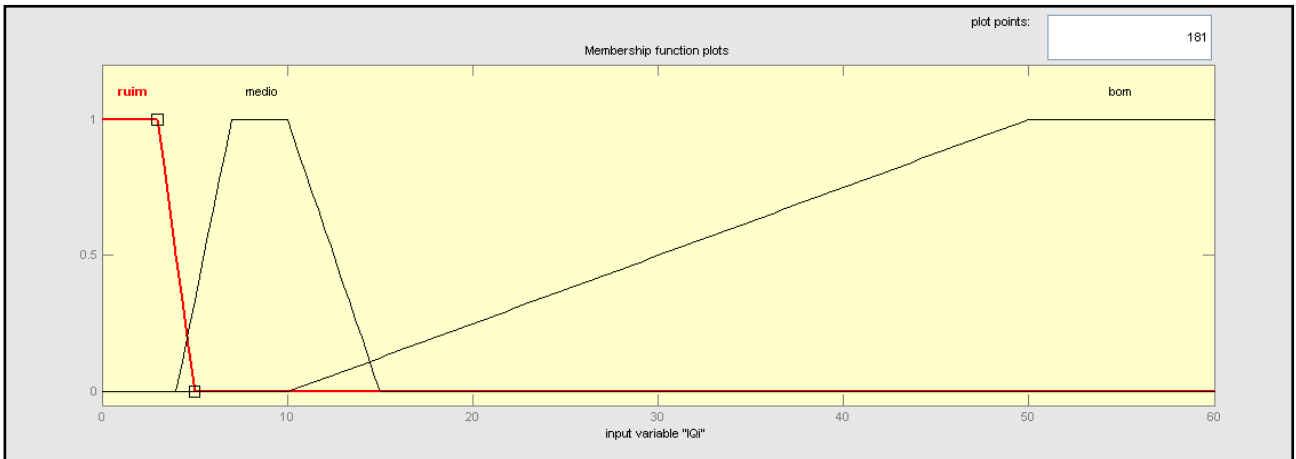


Figura 7: Curva de Permanência de IQ_D

- Índice de Qualidade da Inundação (IQI):

Com base na análise individual realizada por especialistas, constrói-se a curva de pertinência deste índice, mostrado na Figura 13.



- Índice de Qualidade de Potência (IQP):

Segue a curva de pertinência do índice de qualidade de potência.

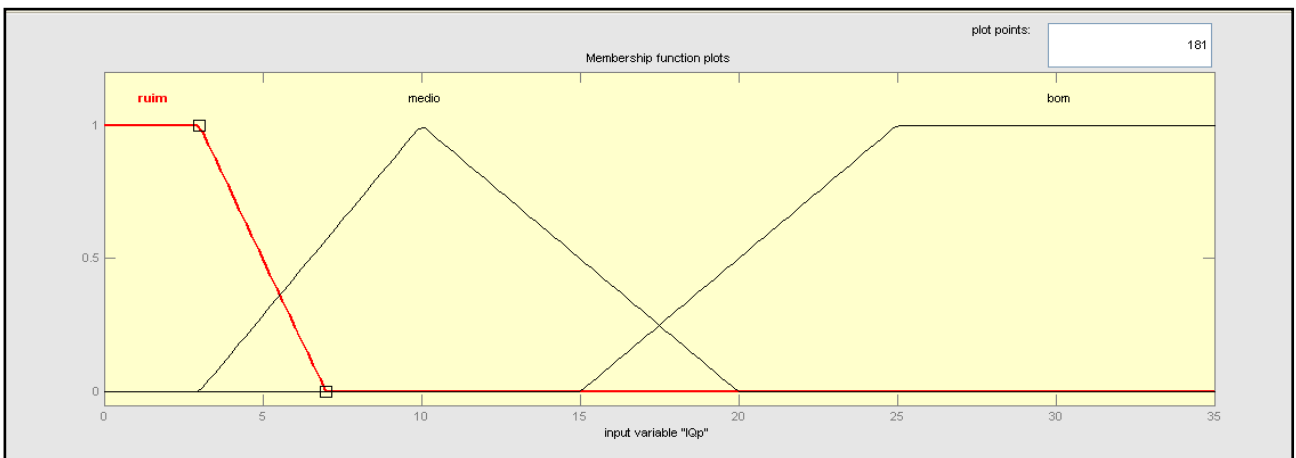
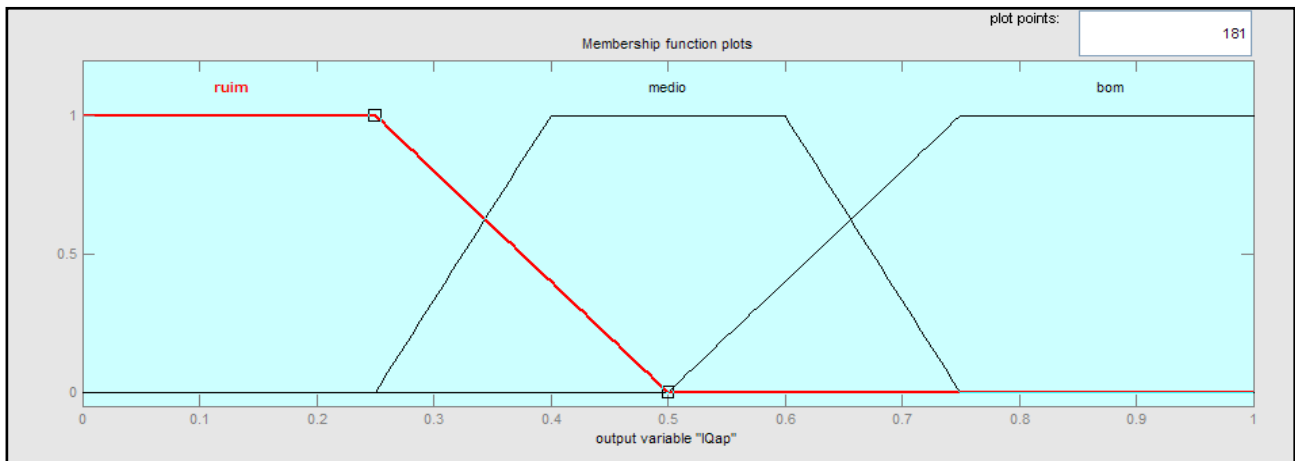


Figura 9: Curva de Permanência de IQP

4.2 Índice de Qualidade Técnica do Aproveitamento (IQT_{AP})

Para a avaliação dos empreendimentos define-se um índice de qualidade técnica dos aproveitamentos (IQT_{AP}). Este índice pode ser descrito como uma variável fuzzy com as seguintes pertinências:



Empregam-se tais pertinências, dentre outras coisas, para a desfuzzificação de IQTAP, permitindo, assim, chegar a números não fuzzy. Com ele pode-se ordenar a qualidade dos potenciais, embora sempre deva ser lembrado que se emprega a lógica fuzzy para alcançá-lo.

4.3 SENTENÇAS (REGRAS) LÓGICAS DE QUALIDADE DOS POTENCIAIS

Foram geradas as regras lógicas de classificação dos atributos. Inicialmente foram geradas 28 regras associando cada um dos seis índices às possíveis variações dos mesmos em uma central, conforme indicado a seguir.

- 1) If (IQi is bom) and (IQb is bom) and (IQd is bom) and (IQcr is bom) and (IQh is bom) and (IQp is bom) then (IQap is bom)
- 2) If (IQi is medio) and (IQb is medio) and (IQd is medio) and (IQcr is medio) and (IQh is medio) and (IQp is medio) then (IQap is medio)
- 3) If (IQi is ruim) and (IQb is ruim) and (IQd is ruim) and (IQcr is ruim) and (IQh is ruim) and (IQp is ruim) then (IQap is ruim)
- 4) If (IQh is ruim) and (IQp is ruim) then (IQap is ruim)
- 5) If (IQh is ruim) and (IQp is bom) then (IQap is medio)
- 6) If (IQh is medio) and (IQp is bom) then (IQap is bom)
- 7) If (IQh is bom) and (IQp is bom) then (IQap is bom)
- 8) If (IQd is medio) and (IQh is ruim) then (IQap is ruim)
- 9) If (IQi is bom) and (IQh is bom) and (IQp is bom) then (IQap is bom)
- 10) If (IQi is bom) and (IQd is bom) and (IQh is bom) and (IQp is medio) then (IQap is medio)

- 11) If (IQi is bom) and (IQd is bom) and (IQh is medio) and (IQp is medio) then (IQap is medio)
- 12) If (IQi is medio) and (IQd is bom) and (IQh is medio) and (IQp is medio) then (IQap is medio)
- 13) If (IQi is ruim) and (IQd is bom) and (IQh is bom) and (IQp is ruim) then (IQap is ruim)
- 14) If (IQi is bom) and (IQb is bom) and (IQd is bom) and (IQp is ruim) then (IQap is medio)
- 15) If (IQb is ruim) and (IQd is ruim) and (IQh is bom) then (IQap is ruim)
- 16) If (IQi is bom) and (IQd is bom) and (IQp is bom) then (IQap is bom)
- 17) If (IQi is ruim) and (IQd is medio) and (IQp is medio) then (IQap is ruim)
- 18) If (IQi is ruim) and (IQp is ruim) then (IQap is ruim)
- 19) If (IQd is ruim) and (IQp is ruim) then (IQap is ruim)
- 20) If (IQb is ruim) and (IQh is ruim) then (IQap is ruim)
- 21) If (IQb is ruim) and (IQp is ruim) then (IQap is ruim)
- 22) If (IQb is ruim) and (IQd is ruim) then (IQap is ruim)
- 23) If (IQi is bom) and (IQb is bom) and (IQd is bom) and (IQcr is bom) and (IQh is bom) and (IQp is bom) then (IQap is ruim)
- 24) If (IQi is medio) and (IQb is medio) and (IQd is medio) and (IQcr is medio) and (IQh is medio) and (IQp is bom) then (IQap is bom)
- 25) If (IQh is ruim) and (IQp is bom) then (IQap is medio)
- 26) If (IQb is medio) and (IQd is medio) and (IQh is medio) and (IQp is bom) then (IQap is bom)
- 27) If (IQh is ruim) and (IQp is bom) then (IQap is ruim)
- 28) If (IQi is ruim) and (IQb is bom) and (IQd is bom) and (IQcr is bom) and (IQh is bom) and (IQp is medio) then (IQap is ruim)

Por essas regras gerou-se o IQTAP, que é o Índice de Qualidade Técnica do Aproveitamento. Neste índice, o resultado é desfuzzificado e o resultado da simulação é obtido para o intervalo 0 e 1. Após submeter as variáveis de entrada às regras lógicas, obtêm-se a saída onde, quanto mais elevado o índice, melhor o aproveitamento.

5 - ESTUDO DE CASOS: RIO CAXIXE

A metodologia descrita anteriormente foi aplicada para o rio Caxixe, no estado do Espírito Santo, e para o rio Preto e Claro, em Goiás. Os índices encontrados pelas equações descritas anteriormente estão mostrados na Tabela a seguir.

Tabela 1: Índices de Qualidade Técnica – rio Caxixe.

Empreendimento	IQ _I	IQ _B	IQ _D	IQ _{CR}	IQ _H	IQ _P	IQ _{AP}
AHE 1	247,62	9,06	0,72	0,79	192,50	5,20	0,500
AHE 2	4597,70	1,51	2,61	1,69	168,06	4,00	0,500
AHE 3	3695,65	1,69	1,08	1,52	257,98	8,50	0,820
AHE 4	187,50	0,87	2,32	2,24	149,07	4,50	0,500
AHE 5	25,81	2,35	2,00	1,74	85,82	2,40	0,202
AHE 6	19,41	0,08	0,88	0,92	101,60	3,30	0,299
AHE 7	31,79	0,49	1,33	1,30	110,05	5,50	0,500
AHE 8	280,95	8,06	1,14	1,05	114,12	5,90	0,500
AHE 9	192,86	3,82	1,61	2,68	61,22	2,70	0,218
AHE 10	2,11	0,03	3,20	3,07	156,07	2,00	0,168

Os aproveitamentos AHE 1, 3, 7, e 8, analisando sob o ponto de vista técnico, apresentam potência considerável e baixos custos com equipamentos, barragem e desvio, tornando-os viáveis tecnicamente. Os demais aproveitamentos deste rio apresentam baixa atratividade técnica devido, principalmente às baixas potências de cada um deles.

Tabela 2: Índices de Qualidade Técnica – rio Preto.

Empreendimento	IQ _i	IQ _B	IQ _D	IQ _{CR}	IQ _H	IQ _P	IQT _{AP}
AHE 11	0,92	0,01	3,65	2,72	28,08	31,10	0,500
AHE 12	3,47	0,16	14,12	8,47	10,81	10,19	0,421
AHE 13	3,25	0,05	6,00	1,60	21,21	22,50	0,462
AHE 14	1,34	0,05	33,55	23,75	27,89	2,30	0,168
AHE 15	0,99	0,06	23,13	16,80	23,34	1,60	0,168
AHE 16	0,81	0,05	5,93	2,67	23,34	1,60	0,168
AHE 17	1,78	0,31	16,70	11,65	37,10	1,30	0,172
AHE 18	14,44	0,34	32,60	21,12	49,03	1,30	0,172

O aproveitamento com IQT_{AP} 0,500 (AHE 11), apresenta o melhor resultado pelo índice de qualidade técnico, notadamente pela boa queda, embora apresente reservatório com dimensões acima do estipulado para PCH, isto é compensado pela maior potência. Ao se analisar os aproveitamentos AHE 12 e AHE 13 observa-se que estes apresentam área alagada relativamente pequena em comparação ao AHE 1. Especificamente, o AHE 3 apresenta pequena área alagada, com relativamente alta queda e potência, justificando assim seu índice técnico de 0,462, com custos de equipamentos (IQ_H) relativamente baixos. Já no AHE 2, que apresenta índice relativamente inferior aos AHE 1 e 3 (0,421), nota-se que esse valor encontrado relaciona-se com o custo dos equipamentos, que são muito elevados, podendo inviabilizar a central. Relativo aos demais aproveitamentos localizados neste rio, que apresentam índices técnicos entre 0,168 e 0,172, alguns

deles apresentam potência viável, mas devido aos altos custos referente aos equipamentos, isto pode torná-los inviável economicamente.

Tabela 3: Índices de Qualidade Técnica – rio Claro.

Empreendimento	IQ_i	IQ_B	IQ_D	IQ_{CR}	IQ_H	IQ_P	IQ_{TAP}
AHE19	2,04	0,09	10,65	6,45	17,27	6,00	0,168
AHE 20	1,29	0,09	17,65	10,45	21,15	4,00	0,168
AHE 21	0,55	0,04	0,00	0,00	24,42	3,00	0,202
AHE 22	0,30	0,04	2,59	1,81	20,87	2,00	0,181
AHE 23	0,48	0,01	10,06	6,49	49,15	3,00	0,168
AHE 24	1,31	0,01	0,81	0,78	29,52	1,00	0,168
AHE 25	2,36	0,02	6,10	3,47	35,11	4,00	0,168
AHE 26	4,98	0,01	2,27	1,98	105,91	2,00	0,184
AHE 27	8,66	0,02	2,72	2,04	94,02	2,00	0,177
AHE 28	14,18	0,14	0,75	0,53	156,07	2,00	0,187
AHE 29	13,89	0,05	9,72	5,24	132,96	1,00	0,168
AHE 30	7,58	0,01	4,27	3,06	143,17	2,00	0,168
AHE 31	294,12	2,15	1,27	0,67	182,50	2,00	0,500
AHE 32	454,55	2,73	2,46	1,69	182,50	2,00	0,185

Comparando os AHE's 30 e 31, que apresentam potência e queda bruta relativamente próximas, vê-se que o primeiro é muito melhor tecnicamente que o segundo pela quantidade reduzida de obra civil, refletida por sua pequena barragem e pelo pequeno reservatório. Já quando comparado com o AHE 32, que apresenta a mesma potência e queda, o AHE 31 é melhor qualificado tecnicamente pelo melhor custo referente ao sistema de adução, cerca de duas vezes maior que no AHE 21. O segundo aproveitamento com melhor índice técnico é o AHE 21. Porém, devido a relativa baixa potência e relativos altos custos com equipamentos, este aproveitamento pode se tornar inviável tecnicamente. Os demais aproveitamentos apresentam baixos índices de qualidade técnica (0,168 – 0,187), podendo tornar-se inviáveis tecnicamente devido à baixa potência.

6 - CONCLUSÃO

Considerando o momento e o cenário atual de demanda energética mundial, e particularmente, brasileira, nota-se, claramente, a necessidade de incremento na geração de energia elétrica. Devido a abundância de recursos hídricos existentes no território brasileiro, e diante de incentivos federais para investimentos nesse setor, as PCH's reaparecem como uma boa opção para absorver esta demanda.

Neste sentido, mesmo diante da disponibilidade do recurso, é evidente a dificuldade encontrada no que concerne à localização e viabilidade de um aproveitamento. Assim, a

metodologia proposta nesta dissertação foi desenvolvida de forma a auxiliar na seleção preliminar de aproveitamentos hidrelétricos, analisando sua viabilidade técnica e sócio-ambiental. Para isto baseou-se a metodologia na Lógica Fuzzy, amplamente utilizada em metodologias da área do setor energético e outros setores.

Na lógica Fuzzy o conjunto dos números reais tem um significado especial. As funções de pertinência destes conjuntos têm um significado claramente quantitativo e podem, sob certas condições, ser vistos como números fuzzy, que se constitui numa ferramenta básica em raciocínio aproximado, sendo também utilizados na simulação e solução de problemas visando previsão e planejamento, e apresentando bons resultados.

Ao se escolher trabalhar com a lógica fuzzy nesta metodologia, opta-se pelas variáveis qualitativas ao invés de quantitativas, analisando-se, assim, as incertezas inerentes à seleção dos aproveitamentos, juntamente com características de cada PCH em particular, obtendo-se então, um ferramental adequado à seleção destas alternativas.

Utilizando desta teoria, desenvolveu-se índices preliminares (IQ's) que compõem um índice final de viabilidade técnica (IQT_{AP}) Buscou-se, por meio destes índices criar um filtro inicial que analisa a viabilidade técnica dos aproveitamentos hidrelétricos, em uma visão macro dos mesmos, tanto na fase de prospecção, quanto em uma etapa posterior, nos estudos de inventário.

Os resultados aqui encontrados foram comparados com metodologias clássicas utilizadas atualmente. Para a avaliação técnica, os índices foram comparados com índices custo-benefício. Diante disto, ficou claro a validação da metodologia aqui desenvolvida e comprovada como ferramenta auxiliar para tomada de decisão quanto a viabilidade técnica dos PCH's, de modo geral.

Esta metodologia não exclui outras metodologias existentes e renomadas. Ela deve ser utilizada juntamente com outras, sendo complementada, de modo a se a realizar uma análise de viabilidade técnica, ambiental e econômica dos aproveitamentos, em geral.

Com os resultados obtidos, comparado-os com os estudos ainda em elaboração e consultando-se especialista do setor, conclui-se que os índices aqui elaborados e propostos são muito úteis no auxílio preliminar referente a viabilidade técnica dos aproveitamentos.

Vale ressaltar, entretanto, que a metodologia que foi proposta neste artigo deve passar por refinamentos e adaptações. Como patamar mínimo para um aproveitamento ser analisado nestes aspectos, considera se o empreendimento se localiza em terras indígenas e/ou de populações tradicionais, como por exemplo, populações quilombolas. Com a aplicação desta aos demais aproveitamentos hidrelétricos, algumas modificações serão exigidas de modo a aprimorar e refinar os resultados. Essas mudanças podem estar relacionadas aos atributos e características físicas consideradas, as curvas de pertinências dos índices, a elaboração de novos atributos, considerando,

por exemplo, linhas de transmissão e outros. Porém, essas modificações somente serão sentidas e necessárias com a aplicação contínua da metodologia a outros aproveitamentos.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, D. A. (2005). *“Ferramenta de Desenvolvimento e Aplicação da Lógica Fuzzy”*. Dissertação de Mestrado defendida na Universidade Federal de Itajubá.

CLEMENTE, L. (2001). *“Seleção da potência instalada ótima de PCHs no contexto de mercados competitivos”*. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Paraná.

CUNHA, Y. S. R. (2007). *“Avaliação de Impacto de Operação de Reservatórios Hidrelétricos no Turismo através da Definição de Regras Utilizando Clusterização Heurística e Lógica Fuzzy”*. Dissertação de mestrado defendida na Universidade Federal de Itajubá.

FRAENKEL, P. ET AL. (1991). *“Micro-Hydro Power: A Guide for Development Workers,”* IT Publications, London.

FILHO, G.L.T; ET AL (2006). *“Um Panorama das Pequenas Centrais no Brasil”*. Simpósio de Pequenas e médias centrais hidrelétricas , Florianópolis.

GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. S. (1999) *“Sistemas Inteligentes – Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais”*. ABRH.

JUNIOR, L. U. R. (2004). *“Contribuições metodológicas visando a outorga do uso de recursos hídricos para geração hidrelétrica”*. Dissertação de Mestrado defendida na Universidade Federal de Itajubá.

MEMÓRIA DA ELETRICIDADE. (1988). *“Panorama do Setor de Energia Elétrica no Brasil”*. Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, JOSÉ G. A. DO. (1999). “*Considerações sobre Incentivos Regulatórios à Geração Descentralizada de Energia Elétrica no Brasil*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia defendido na Universidade Federal de Itajubá.

SANTOS, A.H.M., FILHO, G.L.T., (1997). “*Metodologia Simplificada para Estudos Dinâmicos de Centrais Hidrelétricas, Visando a Determinação das Turbinas*” Paper publicado na Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, Vol. 2.

SOUZA, Z., FUCHS, R.D., SANTOS, A. H. M.,(1983). “*Centrais Hidro e Termelétricas*”, São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá, MG: Escola Federal de Engenharia.

SOUZA, Z.; SANTOS, A.H.M.; BORTONI, E.C. (1999). “*Centrais Hidrelétricas: Estudos para Implantação*”. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. – ELETROBRÁS.

SOUZA, Z.; FILHO, G. L. T. (2008). “*O limite energético aproveitável de um potencial hidroenergético de um curso d’água.*” Artigo apresentado no VI Simpósio brasileiro sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas, Belo Horizonte – MG.

TIAGO FO. G L. ET AL. (2003). “*Pequenas Centrais Hidrelétricas*”, cap 3, in TOLMASQUIM, Maurício Fontes Renováveis de Energia no Brasil, INTERCIÊNCIA – Rio de Janeiro. p 163-206

VITA, (1979). “*Overshot Water-Wheel: Design and Construction Manual*”.